

BfS-Vorhaben

Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten

Determination of SAR-values occurring during the everyday use of mobile phones

Schlussbericht

Projektlaufzeit 01.12.2003 bis 31.05.2005

Forschungsnehmer:

Dr.-Ing. Reinhard Georg
Ingenieurbüro für Telekom-Consult



TTI GmbH an der Universität Stuttgart
(Abteilung für Hochfrequenzanwendungen)

Transfer- und Gründerzentrum: HOCHFREQUENZANWENDUNGEN (HFA)





Forschungsnehmer:

Dr.-Ing. Reinhard Georg
Ingenieurbüro für Telekom-Consult
Zeilstraße 20, D-61476 Kronberg/Taunus
Tel.: 06173-66311, Fax 06173-68258 und
Tel.: 0800-DRGEORG = 0800-3743674
E-Mail: georg@telekom-consult.de

mit:

Technologie Transfer Initiative an der Universität Stuttgart GmbH
Abteilung für Hochfrequenzanwendungen (HFA)
Prof. Dr.-Ing. habil. Friedrich M. Landstorfer
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Tel.: 0711-685-7411, Fax: 0711-6857412
E-Mail: f.landstorfer@ihf.uni-stuttgart.de
<http://www.ihf.uni-stuttgart.de>

und

EM Software & Systems GmbH,
Dr.-Ing. Ulrich Jakobus (Privatdozent)
Otto-Lilienthal-Strasse 36, 71034 Böblingen
Tel.: 07031-714-5200, Fax: 07031-714-5249
E-Mail: u.jakobus@emss.de, <http://www.emss.de>

Fachbetreuung beim BfS

Frau PD Dr. Blanka Pophof
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit
Ingolstädter Landstraße 1
D-85764 Oberschleißheim/Neuherberg
Tel.: 01888 333 2146
Fax: 01888 333 2305
E-Mail: bpophof@bfs.de



Projektlaufzeit:

01.12.2003 bis 31.05.2005

Berichtszeitraum des Schlussberichtes:

Dezember 2003 bis Mai 2005

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Verantwortlich für den Bericht: Dr.-Ing. Reinhard Georg

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	Seite 7
2. Summary	Seite 10
3. Zielsetzung	Seite 12
4. Bestandsaufnahme mit Literaturstudie und Bewertung	Seite 13
4.1 Normen	Seite 13
4.2 Expositionen und Grenzwerte	Seite 15
4.3 Messverfahren	Seite 17
4.4 Berechnungsverfahren	Seite 22
4.4.1 Auswahl des Berechnungsverfahrens	Seite 23
4.5 Bewertende Literaturübersicht einschließlich der Eignung der unterschiedlichen Verfahren für die Projektdurchführung	Seite 27
4.5.1 Ergänzende Literaturbewertung während der Projektlaufzeit (u. a. Leistungsregelung)	Seite 28
5. GSM-Messungen	Seite 32
5.1 Messfahrten	Seite 32
5.1.1 Messfahrten mit PKW	Seite 32
5.1.1.1 Ergebnisse des ersten Messzyklus vom Mai 2004	Seite 33
5.1.1.2 Ergebnisse des zweiten Messzyklus vom Juli 2004	Seite 36
5.1.1.3 Auswertung der fünf PKW-Messfahrten	Seite 39
5.1.2 Messfahrten im Zug	Seite 41
5.2 Messungen beim Gang durch ein Gebäude	Seite 53

5.3	Messungen bei Telefonaten in einem Raum	Seite 60
5.3.1	Telefonat in einem Raum (ohne Zellwechsel), GSM 1800-Netz	Seite 60
5.3.2	Telefonate in einem Raum (ohne Zellwechsel), GSM 900-Netz	Seite 67
5.4	Messungen beim Zufußgehen im Freien	Seite 73
6.	UMTS-Messungen	Seite 77
6.1	Messungen bei einem Telefonat im Raum	Seite 78
6.2	Messung beim Gang durch ein Gebäude	Seite 79
6.3	Messungen bei Fahrt mit PKW	Seite 80
6.4	UMTS und Datenübertragung	Seite 81
6.5	Tabellarische Auswertung der UMTS-Messungen	Seite 83
7.	Vergleich der Projekt-Messergebnisse aus 2004 mit publizierten Messungen aus 1998	Seite 84
8.	Voruntersuchungen zur Verifikation der Berechnungsmodelle	Seite 87
8.1	Erstellung des Berechnungsmodells für das Mobiltelefon	Seite 87
8.2	Verifikation des Berechnungsmodells für das Mobiltelefon durch Messungen an einem Boxphantom	Seite 88
8.2.1	Beschreibung des Aufbaus	Seite 88
8.2.2	Ergebnisse	Seite 90
8.3	Verifikation des Berechnungsmodells durch Messungen an einem realen Kopfphantom	Seite 92
8.3.1	Beschreibung des Aufbaus für die "Touch"-Position	Seite 92
8.3.2	Ergebnisse für die "Touch"-Position	Seite 94
8.3.3	Beschreibung des Aufbaus für die "Tilt"-Position	Seite 96
8.3.4	Ergebnisse für die "Tilt"-Position	Seite 97

9. Rechnerische Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Sendeleistung und SAR-Wert	Seite 100
9.1 Überblick über die Berechnungen	Seite 100
9.2 Konvergenztests	Seite 101
9.2.1 Konvergenztests für das Kopf-Modell	Seite 102
9.2.2 Konvergenztests für das Hand-Modell	Seite 105
9.2.3 Konvergenztests für das Mobiltelefon-Modell	Seite 108
9.2.4 Zusammenfassung der Konvergenzuntersuchungen	Seite 111
9.3 Untersuchungsergebnisse	Seite 111
9.3.1 Ergebnisse für GSM 900 (902,5 MHz)	Seite 112
9.3.2 Ergebnisse für GSM 1800 (1747,5 MHz)	Seite 113
9.3.3 Ergebnisse für UMTS (1950 MHz)	Seite 114
9.4 Bewertung	Seite 115
10. Strahlenhygienische Bewertung	Seite 116
11. Literaturverzeichnis	Seite 120
12 Erläuterungen	Seite 125
12.1 Erläuterung zu Standardabweichungen und Mittelwert	Seite 125
12.2 Erläuterung zu den Leistungsregelungsstufen	Seite 128
12.2.1 Erläuterung zu Leistungsregelungsstufen bei GSM	Seite 128
12.2.2 Erläuterung zur Sendeleistungsregelung bei UMTS	Seite 129

1. Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, reale Expositionsdaten in Verbindung mit der Handynutzung zu erheben sowie die zugehörigen SAR-Werte zu bestimmen. Hierzu waren im Rahmen dieses Projektes Verfahren zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition des Nutzers zu diskutieren und neu zu entwickeln. Die realen SAR-Werte, die bei der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten, waren messtechnisch und, soweit dies nicht möglich war, rechnerisch zu bestimmen. Zu bestimmen waren diese Werte für GSM-Mobilfunk (sowohl bei 900 MHz als auch bei 1800 MHz); ein Teil der Untersuchungen wurde auch für den UMTS-Mobilfunk durchgeführt.

Um verschiedene Nutzer-Szenarien zu untersuchen, wurden Messfahrten mit dem PKW, im Zug, bei einem Gang durch ein Gebäude, im Freien und zusätzlich stationäre Telefonate in einem Raum ohne Zellwechsel durchgeführt.

Derartige Untersuchungen, die die tatsächliche Exposition in Abhängigkeit der Nutzer-szenarien messen, sind bislang nur sehr vereinzelt durchgeführt worden, obwohl sie für eine Bewertung der Strahlungsimmission auf den Menschen entscheidend sind. Untersuchungen wurden in [1] im Sommer 2005 publiziert und in [2] im November 2000, beide Untersuchungen waren jedoch nicht so detailliert wie in diesem Projekt, und vor allem wurde nicht die zeitliche und räumliche Abhängigkeit bei Telefonaten in den verschiedenen Varianten und mit unterschiedlichen Personen untersucht.

Das in diesem Projekt erstmals verwendete Verfahren, die jeweiligen Größen direkt auszu-lesen und den zugehörigen SAR-Wert mit dem Feldberechnungsprogramm FEKO zu berechnen und anschließend die Messwerte und den berechneten Wert zeitkongruent in das zugehörige Videobild einzukopieren, geben zum ersten Mal Aufschluss über die Abhängigkeit des SAR-Wertes und der Sendeleistung vom Empfangspegel, vom Verhalten der Versuchsperson und vom Umfeld.

Das besondere an den Projektergebnissen ist, dass nicht nur ein über einen längeren Zeitraum gemittelttes Ergebnis festgestellt werden konnte, sondern dass die tatsächlichen momentan auftretenden Werte erfasst werden konnten. Diese Werte wurden dann gemittelt und die Standardabweichungen bestimmt. Entscheidend sind aber die Erkenntnisse über den momentanen Verlauf und damit der Einblick in das Netzregelverhalten, in die Konfiguration der Netze abhängig vom Netzbetreiber und in die örtlichen Bedingungen (ländlicher Bereich, Stadt und besonders interessant die Sondersituation bei den Messungen in der Halle 13 während der CeBIT 2005).

Da der SAR-Wert nicht direkt im menschlichen Kopf gemessen werden kann, muss man sich entweder einer Hilfskonstruktion mittels eines Messkopfes (Maschek-Messkopf) bedienen oder eines Berechnungsverfahrens, um den SAR-Wert aus der Sendeleistung und der Handhaltung des Telefons zu berechnen.

Zwischen der Sendeleistung eines Mobiltelefons und dem resultierenden SAR Wert besteht ein linearer Zusammenhang. Um diesen Zusammenhang zu erfassen, genügt daher für jede

Konfiguration (z.B. Position des Mobiltelefons, Frequenz etc.) eine einzelne exemplarische Berechnung für eine im Prinzip beliebig gewählte Sendeleistung. Derartige Berechnungen wurden in diesem Projekt mit den vorgestellten und verifizierten Berechnungsverfahren durchgeführt. Ist damit der lineare Zusammenhang dann bekannt, kann über eine einfache Skalierung die für alle untersuchten Szenarien gemessene Sendeleistung in einen SAR Wert umgerechnet werden.

Dabei wird jeweils zwischen Hand und Kopf und hierbei wiederum zwischen jeweils dem Peak-SAR-Wert (gemittelt über einen 10 g-Würfel) und dem über das gesamte Hand- bzw. Kopfvolumen gemittelten SAR-Wert unterschieden.

Die Berechnungsfaktoren wurden für sechs verschiedene Haltungsvarianten des Handys ermittelt (Mund anliegend und abstehend, Kinn anliegend und abstehend und Nase anliegend und abstehend). Die verschiedenen Handhaltungen wurden aus den Videodokumentationen entnommen, bei denen sich diese sechs unterschiedlichen Haltungen als charakteristisch herausgestellt haben. Des Weiteren wurden die Berechnungsfaktoren jeweils für GSM 900 und GSM 1800 und für UMTS ermittelt.

Insgesamt ergaben sich somit 72 unterschiedliche Berechnungsfaktoren, mit denen abhängig von der Frequenz und von der Haltung des Telefons durch den Probanden die jeweils hierzu entsprechenden SAR-Werte aus der protokollierten Sendeleistung errechnet werden konnten.

GSM

Für GSM ist charakteristisch, dass mit jedem Zellwechsel ein Hochregeln der Sendeleistung des Mobilfunkendgerätes auf den im jeweiligen Netz maximalen Wert (GSM 900: 2 W, GSM 1800: 1 W) erfolgt. Aus diesem Regelverhalten war zu vermuten, dass der im menschlichen Kopf erzeugte SAR-Wert höher ist als in Fällen, in denen nur selten ein Zellwechsel erfolgt.

Die Mittelwerte der maximalen Sendeleistung und des SAR-Wertes betragen ca.:

- bei PKW-Messfahrten mit vielen Zellwechseln und unterschiedlichen Feldversorgungswerten
 - 25 % der max. Sendeleistung und 13 % des max. zulässigen SAR-Wertes
- bei Zugfahrten mit vielen Zellwechseln und schlechter Feldversorgung
 - 50 % der max. Sendeleistung; (der SAR-Wert wurde nicht berechnet, da es sich um einen Messgeräteaufbau handelte)
- bei Messungen in einem Raum ohne Zellwechsel mit guter Feldversorgung
 - 10 % der max. Sendeleistung und 5 % des max. zulässigen SAR-Wertes
- bei Messungen in einem Raum ohne Zellwechsel mit nicht so guter Feldversorgung
 - 20 % der max. Sendeleistung und 10 % des max. zulässigen SAR-Wertes

Hochinteressant waren die Ergebnisse anlässlich der CeBIT; sie zeigten, dass die Netzbetreiber ihre Netze (durch viele kleine Zellen bzw. durch eine Begrenzung der Sendeleistung des Mobilteils beim Handover bzw. durch einen besonders schnellen Regelalgorhythmus) auch so konfigurieren können, dass der Mittelwert der maximalen Sendeleistung des Mobilteils je nach Netzbetreiber nur noch 0,02 W bzw. nur noch 0,07 W von maximal möglichen 1 W bzw. 2 W betrug.

UMTS

Da bei UMTS bei einem Zellwechsel keine Regelung auf einen Maximalwert erfolgt, sondern UMTS mit niedriger Sendeleistung beginnt und nur so weit hoch regelt, wie es erforderlich ist, waren Unterschiede zu GSM zu erwarten.

Es wurde eigentlich nicht damit gerechnet, dass die SAR-Werte bei UMTS um viele Größenordnungen niedriger sind.

UMTS-Messungen sind bislang in dieser Weise nicht durchgeführt und in der Literatur publiziert worden. In diesem Projekt wurden bei den durchgeführten UMTS-Messungen SAR-Werte ermittelt, die je nach untersuchtem Szenarium ca. 1.000fach bis ca. 10.000fach unter dem zulässigen Grenzwert von 2 W/kg lagen.

Die Nutzung von UMTS-Mobiltelefonen wäre für Menschen, die aus subjektiven Gründen ihre persönliche Strahlungsimmission auch unterhalb des Grenzwertes noch weiter reduzieren möchten, eine interessante Alternative.

Nachdem bislang in der Literatur nur wenig Informationen über die tatsächlichen in der Praxis auftretenden SAR-Werte bei unterschiedlicher alltäglicher Nutzung vorlagen, konnten mit diesem Projekt Aussagen zu den alltäglich auftretenden SAR-Werten gemacht werden. Die Untersuchungen wurden besonders bei den stationären Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt (30 Minuten), da zukünftig bedingt durch die Tarifpolitik der Netzbetreiber, die Mobilfunkkommunikation auch stationär und zeitlich länger eingesetzt wird.

Es wurden in diesem Projekt unterschiedliche Mobilfunkendgeräte verwendet. Da die am Messort vorhandenen Feldversorgungswerte sich jedoch permanent ändern und außerdem die Versuchsperson das Telefon jedes Mal etwas anders hält, lassen sich aus den Messergebnissen keine Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Mobilfunkendgeräten ableiten.

Alle Messungen wurden auf Video dokumentiert. In diese Videodaten wurden zusätzlich die Messparameter und die errechneten SAR-Werte eingeblendet, sodass sich den jeweiligen SAR-Werten die zugehörigen Körperhaltungen, die Bewegungen und die Rahmenbedingungen eindeutig zuordnen lassen.

2. Summary

The determination of the radiation exposure caused by mobile phones in everyday situations in terms of the Specific Absorption Rate (SAR) forms the main aspect of this project.

As this value cannot be measured inside the user's head, new methods have to be developed and applied to determine the exposure in GSM 900, GSM 1800 and UMTS networks for representative situations and locations. To cover most of every-day usage of mobile phones, journeys by car and train as well as walks inside or outside a building have been investigated. Stationary phone calls inside an office with a duration of half an hour performed by several volunteers complete the data collection.

Up to now, the exposition level within such scenarios has only been investigated in particular cases and not as intensively as in this project. The most important difference to previous works on this topic is the consideration of both the temporal and local dependence of the exposition level while a phone call takes place instead of using statistical values such as mean values or standard deviations, only.

For the determination of the SAR two methods, which are independent of each other and therefore allow a verification of the individual results, have been applied. When possible, the measuring head by Maschek was used to determine the absorbed radiation inside the replication of a human head. Furthermore, the actual used mobile phone's output power was read out of the phone and logged on a PC. Based on this power value, the field computation programme FEKO was used to calculate the related SAR. As the relation between power and SAR is dependent on the frequency used as well as on the position of the mobile phone, this relation was determined for the GSM-frequencies (900 MHz and 1800 MHz) and the UMTS-frequency (1950 MHz) in combination with six different possibilities to hold the mobile phone.

Additionally to a standard documentation by diagrams, the SAR is shown amongst other values related to the receiving signal level of the mobile network on a video, which was recorded during the tests. This makes it possible to link singular effects or changes of the SAR with movements of the test person or changes in the environment.

In the following paragraph, the main results related to GSM networks shall be outlined briefly.

At the beginning of a phone call and when a handover takes place, the mobile phone is ordered to use its maximum power, namely 2 W in GSM 900 and 1 W in GSM 1800. This suggests the SAR to be lower in cases with less or no handovers bearing in mind the additional importance of the receiving signal level. This assumption was found to be true by our tests showing the mean output power of the phone to be only 10 % of the maximum for a long-time phone call inside an office without any handover and a good receiving signal level. Accordingly, the SAR is only 5 % of the allowed limit value of 2 W/kg. Inside a room with worse receiving conditions, these values are doubled. Higher SAR values have been observed during journeys by car (25 % of the maximum power) and train (50% of the maximum power due to fast varying transmission conditions).

A very low exposure has been observed inside the exhibition halls of the CeBIT 2005 in Hannover. The configuration of the network as well as the small distances between user and base-station led to a mean output power which was lower than 5 % of the maximum power for all investigated network providers.

In addition to the work stated above we also carried out some investigations on an UMTS network and the results were compared to GSM. The nature of UMTS makes it obligatory that every device uses the minimum power which is sufficient to hold the connection. Together with the fact that maximum power at the beginning of a call or at a handover is not used, it can be assumed that radiation exposure should be lower than for GSM. Investigations under comparable situations show that presently the exposition is about 1000 times lower in UMTS than in GSM, which is even more than we had expected and leads to the result that the SAR is far beneath the established limits. Therefore UMTS phones might be an option for people who are afraid of radiation but depend on the usage of a mobile phone.

Although different types of mobile phones with different maximum SAR have been used within this project, no analysis related to the special performance of the phones has been carried out since we observed that effects like network coverage (receiving signal level) or shielding effects provoked by the test persons influenced strongly the actual SAR. So a comparison that refers the different results primarily to the different types of mobile phones would not be correct.

This project provides detailed information about the radiation exposure in typical everyday situations which cannot be found in literature, yet. Especially investigating phone calls originating inside a room will achieve more importance as mobile network providers in Germany promote the replacement of the traditional fixed network by mobile phones.

3. Zielsetzung des BfS-Vorhabens

"Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten"

Originaltext in Auszügen aus der BfS-Leistungsbeschreibung:

Einführung

Der flächendeckende Ausbau der Mobiltelefonnetze, der Aufbau der modernen breitbandigen Multimedianeetze (UMTS) sowie der Aufbau des terrestrischen digitalen Rundfunks führen zu einer Erhöhung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Strahlung. In diesem Forschungsprojekt geht es darum, reale Expositionsdaten in Verbindung mit der Handynutzung zu erheben sowie die zugehörigen SAR-Werte zu bestimmen.

Dazu sind zunächst mögliche Verfahren zur Ermittlung der tatsächlichen Exposition des Nutzers von Mobiltelefonen zu diskutieren und ggf. neue zu entwickeln. Außerdem soll durch das Vorhaben an einer Reihe von konkreten Beispielen die zeitliche Variabilität sowie die Abhängigkeit der Exposition des Nutzers vom Gerät, von der Netzstruktur und von Umgebungseinflüssen gezeigt werden. Mithilfe des favorisierten, bzw. neu entwickelten Verfahrens sind die hierzu erforderlichen Expositionsdaten zu erfassen und auszuwerten sowie die realen SAR-Werte, die bei der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten, zu bestimmen.

Grundlagen

Im Hinblick auf die Minimierung der persönlichen Exposition durch Mobiltelefone rät das BfS, bei diesen Geräten auf einen möglichst niedrigen SAR-Wert zu achten. Die SAR-Werte der auf dem Markt befindlichen Handys lagen Ende 2002 etwa zwischen 0,3 und 1,7 W/kg. Der SAR-Wert ist jedoch eine für den Verbraucher nicht einfach zugängliche und verstehbare Größe. Deshalb ist es sinnvoll, dem interessierten Verbraucher eine einfache Orientierung für die Auswahl strahlungsarmer Handys zu ermöglichen. Dies ist im Jahr 2002 durch die Festlegung von Kriterien für die Zertifizierung von strahlungsarmen Handys mit dem Umweltzeichen "Blauer Engel" erfolgt: Handys mit SAR-Werten unter 0,6 W/kg können mit dem "Blauen Engel" als strahlungsarm ausgezeichnet werden. Gleichzeitig signalisiert dieses Zeichen, dass das Gerät umwelt- und recyclingfreundlich produziert wurde.

Da die reale Exposition von Handynutzern und die entsprechenden realen SAR-Werte von Mobiltelefonen nur unzureichend bekannt sind, konnten solche Daten nicht bei den Vergabekriterien für das Umweltzeichen berücksichtigt werden. Stattdessen orientierte man sich am standardisierten maximalen SAR-Wert dieser Geräte. Die im Rahmen dieses Vorhabens erzielten Ergebnisse stellen demnach eine denkbare Ergänzung zu den Vergabegrundlagen für das Umweltzeichen dar.

Die Kenntnis der tatsächlichen Exposition und der entsprechenden SAR-Werte ist aber vor dem Hintergrund der Bewertung der Mobiltelefone unter Strahlenschutzvorsorgeaspekten von grundsätzlichem Interesse. Um belastbare und sinnvolle Vorsorgeempfehlungen geben zu können, sind die mit dem Vorhaben angestrebten Ergebnisse unbedingt erforderlich.

4. Bestandsaufnahme mit Literaturstudie und Bewertung

4.1 Normen

Das Forschungsprojekt ist auf Mobiltelefone fokussiert, da Mobiltelefone, als mobile Handys, direkt neben dem Kopf des Benutzers betrieben werden und damit relativ hohe SAR-Werte verursachen.

Die Einhaltung der SAR-Werte von Mobiltelefonen ist in der europäischen Norm EN 50360 *Produktnorm zum Nachweis der Übereinstimmung von Mobiltelefonen mit den Basisgrenzwerten hinsichtlich der Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (300 MHz – 3 GHz)* geregelt. Die Bestimmung des SAR-Werts ist jedoch ein aufwendiger Vorgang, welcher in der gesonderten Norm EN 50361 *Grundnorm zur Messung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in Bezug auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen (300 MHz bis 3 GHz)* [3] geregelt ist. Nach dieser Norm wird der SAR-Wert des Mobiltelefons unter Abgabe seiner maximalen Sendeleistung in einem Phantom gemessen.

Die so gewonnenen Messergebnisse sind jedoch nur bedingt aussagekräftig. So ist die tatsächliche Einkopplung elektromagnetischer Energie in den Benutzerkopf von mehreren Faktoren abhängig. So kann zum Beispiel ein am Telefon angeschlossenes Kabel, wie z. B. ein Batterieladekabel, das Strahlungsverhalten beeinflussen [4]. Des Weiteren ist ein Mobiltelefon in der Lage, seine Sendeleistung entsprechend der Vorgaben der Basisstation einzustellen. Die Regelung wird dabei wesentlich von der in den Freiraum abgestrahlten Sendeleistung und somit von der zur Verfügung stehenden Empfangsleistung an der Basisstation beeinflusst. Dabei wirkt sich auch die Körperhaltung des Nutzers und die Handhaltung des Telefons aus. Der wohl wichtigste Einflussfaktor ist die Netzinfrastruktur. Ein dichtes Netz von Basisstationen sorgt für gute Funkverbindungen, so dass die Sendeleistungen der Telefone herabgeregelt werden können. Schließlich hängen die realen SAR-Werte noch von den Regelalgorithmen für die Sendeleistung ab.

Durch die hohe Verbreitung von Mobiltelefonen und deren intensiven Nutzung hat die durchschnittliche Strahlenbelastung der Bürger beim Mobiltelefonieren zugenommen.

In Abhängigkeit von der Frequenz dringen elektromagnetische Strahlen unterschiedlich tief in den menschlichen Körper ein. So durchdringt das magnetische Feld eines Magneten (Frequenz 0 Hz) den menschlichen Körper ungehindert, hingegen beträgt die Eindringtiefe der Felder eines GSM-Mobiltelefons (900 MHz bis 1.800 MHz) nur einige mm bis wenige cm. Im menschlichen Körper können Felder Effekte hervorrufen, die von Faktoren wie Frequenz, Modulationsart und Intensität abhängen. Diese Wirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen können grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt werden: Das sind zum einen die thermischen und zum anderen die athermischen Wirkungen.

Alle Effekte, die nicht auf die Erwärmung des Gewebes zurückzuführen sind, wie z. B. Einflüsse auf Muster von EEG-Diagrammen, fallen unter die athermischen Wirkungen. Dabei spielt vermutlich auch die Modulationsart des HF-Signals eine Rolle. Der Nachweis solcher Effekte ist sehr aufwendig und noch schwieriger gestaltet sich der Nachweis einer schädigenden Wirkung.

Anders hingegen verhält es sich mit den thermischen Effekten. Der Mechanismus der Erwärmung von Materie durch elektromagnetische Felder ist seit langem bekannt. So wird dieser Effekt bereits seit längerem in der Medizin (Hyperthermie) benutzt, findet aber auch in vielen Privathaushalten in Form von Mikrowellenöfen Verwendung. Es ist schließlich ersichtlich, dass biologische Gewebemasse durch zu starke Erwärmung, hervorgerufen durch elektromagnetische Felder hoher Intensität, geschädigt werden kann.

Die elektrische Leitfähigkeit des Gewebes führt dazu, dass ein eindringendes elektromagnetisches Feld einen Stromfluss zur Folge hat, der schließlich zur Erwärmung führt. Zur Berechnung der Erwärmung findet die spezifische Absorptionsrate Verwendung. Nach [5] gilt

$$SAR = \frac{j^2}{\sigma\rho} = c \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

Die Größen sind dabei wie folgt definiert:

j	Stromdichte [A/m ²]
σ	Leitfähigkeit [S/m]
ρ	spezifische Masse [kg/m ³]
c	spezifische Wärmekapazität [J/(K · kg)]
dT/dt	Temperaturgradient [K/s]
E	Effektivwert der elektrischen Feldstärke [V/m]

In der angegebenen Formel sind Effekte wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmeabtransport durch den Blutfluss der Einfachheit wegen vernachlässigt.

Zur Vermeidung schädlicher Gewebeerwärmung durch zu hohe elektromagnetische Strahlungsintensität, wurden Grenzwerte für den SAR-Wert festgelegt. Die internationale Kommission für nicht ionisierende Strahlung (ICNIRP) [6] definiert einen zulässigen SAR-Wert von 0,08 W/kg für den ganzen Körper und einen Spitzenwert der SAR von 2 W/kg gemittelt über ein Volumen von 10 g Gewebe.

Verschiedenste elektrotechnische Geräte können bei Personen zu nennenswerten SAR-Werten führen. Daher wurden bereits zahlreiche Untersuchungen angestrengt, welche die wichtigsten Verursacher elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder zum Gegenstand haben [7].

4.2 Expositionen und Grenzwerte

Sobald man von Expositionen und Grenzwerten spricht, sollte man sich über deren Definitionen und Unterscheidungen im Klaren sein, da hier oft Missverständnisse entstehen. Insbesondere handelt es sich hierbei um die Abgrenzung der Teilkörper- von der Ganzkörperexposition mit deren jeweils unterschiedlichen Grenzwerten, wobei bei diesen wiederum zwischen Basisgrenzwerten und Referenzwerten unterschieden wird.

Die Basis dieser Überlegungen ist in den „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields“ der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)* [6] beschrieben.

Unter Ganzkörperexposition wird der Fall verstanden, dass der ganze Körper eines Menschen einem elektromagnetischem Feld ausgesetzt ist, das Gegenteil dazu ist die Teilkörperexposition, bei der, wie etwa bei der Handynutzung am Kopf, bestimmte Körperteile besonders exponiert werden.

Bei der Körperexposition definiert man als Grundlage sogenannte Basisgrenzwerte, welche im Frequenzbereich des Mobilfunks in der Einheit der spezifischen Absorptionsrate SAR in W/kg angegeben werden. Da diese Größe auf komplizierte Weise nur innerhalb des Körpers und somit in der Realität nicht einfach zu messen ist, hat man daraus für die Bedingungen einer Ganzkörperexposition Referenzwerte abgeleitet, daher auch „abgeleitete Grenzwerte“ genannt, welche in einer natürlichen Umgebung einfacher zu messen sind, wie etwa die elektrische Feldstärke oder die im Fernfeld daraus zu berechnende Leistungsflussdichte. Diese Referenzwerte sollen räumlich über den ganzen Körper gemittelte Werte darstellen und wurden nach umfangreichen Betrachtungen so festgelegt, dass selbst unter Zugrundelegung der ungünstigsten Expositionsbedingungen die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden [6].

Bei einer Teilkörperexposition ist diese Mittelung nicht sinnvoll anwendbar, sodass hierfür keine abgeleiteten Grenzwerte definiert werden. Jedoch muss auch bei der Betrachtung einer Ganzkörperexposition bei einer stark inhomogenen Feldverteilung wieder auf den Basisgrenzwert zurückgegriffen werden, da sonst eine falsche Beurteilung der gesamten Exposition möglich ist. Unter solchen Umständen müssen für Grenzwertbetrachtungen entweder die Werte der Teilkörperexposition angewendet oder eine entsprechend aufwändige Bestimmung der tatsächlichen Ganzkörperexposition vorgenommen werden.

Die heute in Deutschland und den meisten anderen Ländern gültigen Grenzwerte wurden nach den oben genannten Empfehlungen der ICNIRP [6] festgelegt.

Die abgeleiteten Grenzwerte betragen in Deutschland für hochfrequente Felder durch ortsfeste Anlagen mit einer EIRP* größer 10 Watt, wie etwa Mobilfunk-Sendemasten, nach der 26. BImSchV [8] für die Allgemeinbevölkerung (Tabelle 1):

Frequenz (f) in Megahertz	Effektivwert der Feldstärke, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle	
	elektrische Feldstärke in Volt pro Meter (V/m)	magnetische Feldstärke in Ampere pro Meter (A/m)
10 - 400	27,5	0,073
400 - 2000	$1,375 f^{0,5}$	$0,0037 f^{0,5}$
	Werte für relevante Frequenzen	
GSM 900	41	0,111
GSM 1800	58	0,157
UMTS 2120	63	0,17

Tabelle 1: Abgeleitete Grenzwerte entsprechend der 26. BImSchV

Diese abgeleiteten Grenzwerte beruhen auf einem Basisgrenzwert der SAR von 0,08 W/kg, für die Frequenzen des Mobilfunks berechnet, betragen sie in der elektrischen Feldstärke somit bei GSM 900 ca. 41 V/m und bei GSM 1800 V/m ca. 58 bzw. UMTS ca. 63 V/m. Daraus lassen sich die zugehörigen Leistungsflussdichten berechnen, diese betragen bei GSM 900 ca. 4,5 W/m² und bei GSM 1800 sowie UMTS ca. 9 – 10 W/m².

Hinzu kommt die Einschränkung, dass bei gepulsten Feldern deren Spitzenwert der elektrischen Feldstärke das 32-fache des Mittelwerts nicht überschreiten darf. Dieser Umstand kommt jedoch beim Mobilfunk (GSM Pulsverhältnis max. 1:8) nicht zum Tragen.

Für Teilkörperexposition gibt es in Deutschland keine gesetzliche Regelung, hier ist die Empfehlung des Europäischen Rates (1999/519/EG) [9] zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0-300 GHz) anzuwenden. Diese entspricht den Empfehlungen der ICNIRP, die für den (alleinig genannten) Basisgrenzwert der Teilkörperexposition für die Allgemeinbevölkerung eine SAR für Kopf und Rumpf von 2 W/kg und für die Gliedmaßen 4 W/kg vorsehen.

Für berufliche Exposition und andere Frequenzbereiche gelten andere Bedingungen, diese sind in den oben genannten Referenzen nachzulesen.

* EIRP = Equivalent Isotropically Radiated Power = äquivalente isotrope Strahlungsleistung; eine Rechengröße zur Beschreibung von Antenneneigenschaften. Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung ist ein Gütemaß von Antennen, die die Parameter Sendeleistung und Antennengewinn¹ umfasst. Die EIRP gibt an, mit welcher Sendeleistung man einen, in der Praxis nicht vorkommenden, Kugelstrahler (isotropen Strahler) versorgen müsste, um dieselbe Leistungsflussdichte² wie mit einer Richtantenne zu erreichen

¹ Antennen mit Richtwirkung erreichen gegenüber in alle Richtungen sendenden (isotropen) Kugelstrahlern einen Antennengewinn. In gleicher Entfernung und bei gleicher zugeführter Leistung erzielt man mit Richtantennen eine höhere Leistungsflussdichte.

² Die Leistungsflussdichte S ist die Energie, die pro Zeiteinheit eine Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle durchströmt, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter (W/m²).

(www.emf-portal.de (RWTH Aachen)).

4.3 Messverfahren zur Bestimmung der SAR-Werte

Im Folgenden werden die verschiedenen Messverfahren unter dem Gesichtspunkt der Eignung für dieses Projekt diskutiert.

Ziel der Messungen ist die Bestimmung der SAR-Werte im Kopf. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik sind direkte Messungen in einem realen lebenden Kopf nicht möglich, weshalb für genaue Messungen ein Kopfphantom herangezogen werden muss. Das am weitesten verbreitete Verfahren besteht dabei aus einem flüssigkeitsgefüllten Kopfmodell, in welchem mit Hilfe besonderer Sonden auf den SAR-Wert geschlossen werden kann [10]. Diese Sonden können zum einen spezielle Temperaturfühler sein oder zum anderen spezielle elektrische Feldsonden.

Im Folgenden wird auf die elektrischen Feldsonden eingegangen.

Unter Vernachlässigung der Wärmeleitung kann der Zusammenhang

$$SAR = c \cdot \frac{dT}{dt}$$

verwendet werden [11], [12]. Hierzu wird das Kopfphantom elektromagnetischen Wellen hoher Leistung ausgesetzt. Unmittelbar nach Beginn der Bestrahlung stellt sich ein Temperaturgradient ein, der proportional zum SAR-Wert ist. Wird diese Temperaturänderung gemessen, so kann mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität c der SAR-Wert nach oben genannter Formel berechnet werden. Bei Zufuhr sehr hoher Leistungen im 100 W-Bereich arbeitet dieses Verfahren zufriedenstellend und wird auch zur Kalibrierung von anderen SAR-Messverfahren verwendet. Die Sendeleistungen von Mobiltelefonen sind jedoch zu gering, um mit diesem Verfahren sinnvolle SAR-Messungen durchführen zu können, da ausreichend empfindliche optische Temperatursensoren, die das elektrische Feld nicht verzerren, nicht verfügbar sind.

Daher haben sich zur Messung von SAR-Werten die elektrischen Feldsonden durchgesetzt, welche überwiegend auf dem in [13] vorgestellten Verfahren beruhen. So werden zur Messung elektrischer Felder Dipolantennen verwendet, welche üblicherweise auf ein Trägersubstrat aufgebracht sind. Die Dipollänge ist dabei wesentlich kleiner als die halbe Wellenlänge, um innerhalb des geforderten Frequenzbereichs einen linearen Frequenzgang zu erzielen. Auf eine metallische Ableitung der Fußpunktspannung muss verzichtet werden, damit das zu messende Feld nicht verzerrt wird. Diese Verzerrung tritt bei hochohmigen Ableitungen jedoch nur in vernachlässigbarer Weise auf. Wegen der hohen Verluste kann jedoch über diese Art von Leitern kein HF-Signal abgeleitet werden. Daher ist die HF-Spannung unter Verzicht einer vorherigen Verstärkung bereits im Fußpunkt des Dipols gleichzurichten. Üblicherweise kommen hier Schottky-Detektordioden mit sehr geringer Durchlassspannung zum Einsatz. Die geringe Länge der Dipolantennen hat eine sehr geringe Ausgangsspannung zur Folge. Die Dioden-Gleichrichter arbeiten daher im quadratischen Bereich, d.h. die Ausgangsspannung nimmt quadratisch mit der Amplitude der gleichzurichtenden HF-Spannung zu. Die Auswertung kleiner HF-Amplituden erfordert daher sehr empfindliche Voltmeter mit einem sehr großen Dynamikbereich.

Zur Bestimmung des SAR-Werts sind alle drei Feldkomponenten auszuwerten. Daher werden üblicherweise Feldsonden, bestehend aus drei einzelnen Dipolen, eingesetzt. Hierzu ist es erforderlich, dass die drei Einzelantennen gleiche Empfindlichkeiten aufweisen, so dass eine ausreichende Isotropie gewährleistet wird. Während die einzelnen Dipolsensoren mit Hilfe der Ätztechnik mit sehr geringen Toleranzen hergestellt werden können und somit reproduzierbar gleiche Empfindlichkeiten erzielt werden, wird die Isotropie dennoch durch die mechanischen Begebenheiten beeinflusst. Insbesondere die Halterung der Sensoren kann sich hier stark auswirken. In [10] wurden verschiedene Konzepte zur Anordnung der Dipole mit dem Ziel der Isotropieoptimierung untersucht und es wurde der Einfluss der dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Mediums auf das Sensorverhalten ermittelt.

Die voranstehend vorgestellten Feldsonden, werden für die betragsmäßige Messung der drei Einzelfeldstärkenkomponenten eingesetzt. Mit Hilfe der drei gemessenen Beträge lässt sich schließlich die Ersatzfeldstärke berechnen. Ist das elektrische Feld jedoch elliptisch polarisiert, so ist eine genaue Messung mit diesem Verfahren nicht mehr möglich und die SAR-Werte werden tendenziell überbewertet. Daher wurde, ausgehend von den Feldsonden aus [10], in [14] eine Methode zur Messung elliptisch polarisierter Feldstärken entwickelt. Hierbei sind fünf Unbekannte zu lösen: die beiden Ellipsenhauptachsen und zum anderen die drei Winkel, welche die Ellipse im Raum ausrichten. Es ist prinzipiell möglich, diese fünf Parameter mit Hilfe von fünf unterschiedlich angeordneten Dipolen zu bestimmen. In [14] wurde ein etwas anderer Lösungsansatz verfolgt und optimiert, indem mit einem besonderen Sensor, bestehend aus einem axialen Träger mit nur zwei geeignet angeordneten Dipolen, für drei verschiedene Längsachsenverdrehungen des Trägers die Einzelfeldstärken gemessen wurden. Aus den gemessenen sechs (2 Einzelsonden mal 3 Verdrehungen) Werten werden schließlich die fünf Unbekannten gelöst.

Die exakte Messung von Feldstärken hängt nicht nur von der Empfindlichkeit, sondern auch von der Größe der Sensoren ab. Die Wellenlängen bei Mobilfunkfrequenzen sind im menschlichen Kopf aufgrund der hohen Dielektrizitätskonstante sehr klein. Daraus ergeben sich stark inhomogene Felder, die nur noch mit sehr kleinen Sensoren exakt erfasst werden. Für diesen Zweck wurde in [5] ein sehr kleiner Sensor entwickelt, der basierend auf [14], ebenfalls zur Messung elliptisch polarisierter Felder eingesetzt werden kann.

Neben den Feldsensoren wird ein geeignetes Kopfphantom benötigt. Dabei ist unterhalb des Phantoms das Mobiltelefon angebracht und an seiner Oberseite ist es offen, so dass eine eingetauchte Feldsonde - von einem Roboter geführt - das Feld abtasten kann. Die einfachste Variante ist der von COST 244 vorgeschlagene Acrylglas-Würfel, welcher mit gewebe-simulierender Masse gefüllt ist. In [11] wird die Genauigkeit des würfelförmigen Modells mit Hilfe von FDTD-Berechnungen evaluiert. Dabei wurde auch die Alterung der Gewebeersatzflüssigkeiten untersucht. Es zeigte sich, dass aufgrund der Verdunstung des Wassers sich die dielektrischen Eigenschaften innerhalb weniger Tage verändern, was schließlich beim Einsatz des Verfahrens berücksichtigt werden muss. Die Untersuchung in [12] hat ebenfalls das würfelförmige Acrylglas-Phantom zum Gegenstand und es wird berichtet, dass die Form des Phantoms keinen Einfluss auf den Spitzen-SAR-Wert hat.

Weiterhin wird in [10] ebenfalls ein Verfahren zur Messung der SAR-Werte angegeben. Prinzipiell arbeitet dieses Verfahren ähnlich wie das in [11] und [12] vorgestellte, jedoch ist

hier das Phantom den menschlichen Konturen nachempfunden. So ist neben dem verhältnismäßig detailgetreuen Kopf auch der Oberkörper nachgebildet. Die Sonden, welche das elektrische Feld robotergeführt abtasten, besitzen einen optischen Detektor, der eine Berührung der Sonde mit der Phantomaußenhaut wirksam verhindert. Auch wenn mit diesem Verfahren verhältnismäßig dicht bis an die Schale heran gemessen werden kann, so muss doch das letzte Stück bis zur Außenhaut durch rechnerische Interpolation ermittelt werden, da Messungen sehr nahe am Rand durch den Randfehler zu stark verfälscht würden. Das in [10] beschriebene Verfahren ist das derzeit genaueste und ist auch in die Norm EN 50361 eingeflossen. Diese Genauigkeit muss jedoch mit einer relativ langen Messdauer von ca. 15 Minuten erkauft werden.

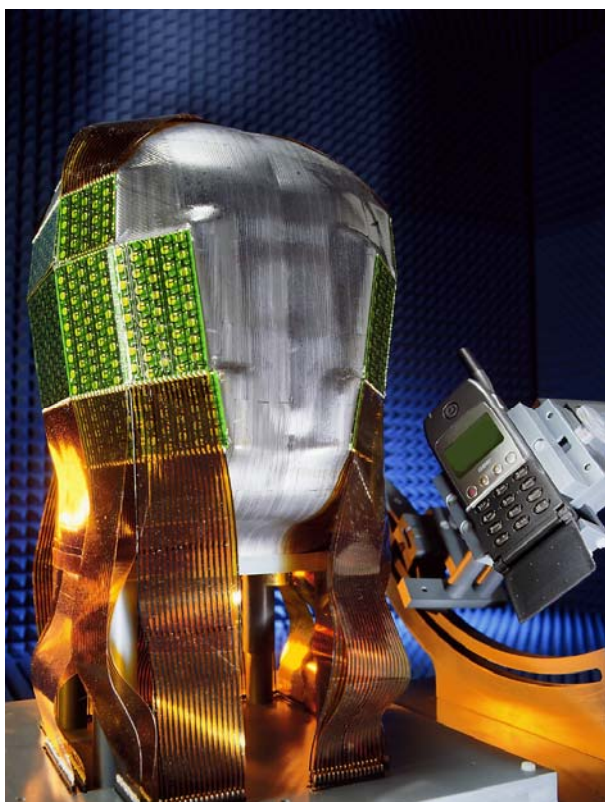


Abbildung 1:
Messung der Feldverteilung
auf der Phantom-Oberfläche

Für viele Anwendungen, wie z. B. in der Fertigung oder im Feldversuch, wären diese Messzeiten zu lang. Ein Verfahren, das diesen Umstand behebt, ist das in [15] und [16] vorgestellte. Dieses Verfahren (Abbildung 1) besitzt keine flüssige Füllung, sondern ist aus einem gesondert entwickelten Kunststoff hergestellt. Bei den D- und E-Netzfrequenzen besitzt es die dielektrischen Eigenschaften menschlicher Kopfgewebemassen. Das Verfahren beruht auf der Messung der Feldverteilung auf der Phantomoberfläche und kommt ohne zeit-aufwendige Roboterabtastung aus. Feldtheoretisch ist es schließlich möglich, anhand der Oberflächenfelder in das Innere des Phantoms „hineinzurechnen“ und die SAR-Werte zu ermitteln. Dieses Verfahren ist jedoch noch im Laborstadium und ist nicht kommerziell verfügbar.



Ein stark vereinfachtes SAR-Messsystem bietet die Fa. Maschek GmbH an. Es besteht aus einem flüssigkeitsgefüllten Kopfphantom, welches auf einem Sockel platziert ist (Abbildung 2). Eine Anzeigeeinheit ermöglicht das einfache Ablesen der SAR-Werte. Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Verfahren enthält dieses Messsystem nur einen einzelnen fest platzierten isotropen Feldsensor. Bei der Positionierung des Mobiltelefons muss daher zunächst das SAR-Maximum gesucht werden. Dieses Messsystem ersetzt keine normgerechte SAR-Messung, ist jedoch aufgrund seiner Kompaktheit und seiner Unabhängigkeit von einer externen Stromversorgung für Feldversuche, wie z. B. Autofahrten oder Fahrten im Zug, gut geeignet. In [17] wurde das Gerät evaluiert.

Abbildung 2: SAR-Messkopf der Firma Maschek GmbH

Ausgewähltes Messverfahren

Für die Projektdurchführung werden zwei unterschiedliche Messverfahren angewendet

- Messungen durch Auslesen der Netzmonitordaten im Mobilfunkendgerät
- Messungen mittels SAR-Messkopf.

Hinweis:

Bei dieser Projektdurchführung wurden die Netzmonitordaten zeitaktuell ausgelesen und auf einem Rechner gespeichert. Es wurden keine 'Softwaremodifizierten Telefone' verwendet; diese registrieren den jeweils auftretenden Sendeleistungswert und speichern die Werte im modifizierten Handy ab. Mit einer entsprechenden Auswertungssoftware lässt sich dann nachträglich die Häufigkeit des Auftretens unterschiedlicher Sendeleistungspiegel feststellen. 'Softwaremodifizierte Telefone' ermöglichen es jedoch nicht, aufzuzeigen unter welchen Rahmenbedingungen welche Sendeleistungswerte auftreten.

Da die SAR-Werte bei der alltäglichen Nutzung, die teilweise mit Video dokumentiert wurde, bestimmt werden sollten, wurde das nachstehend beschriebene Verfahren angewendet.

Erläuterung zum Messverfahren:

Die Sendeleistung eines GSM-Handys wird durch die Basisstation gesteuert. Dies geschieht in der Weise, dass der Empfangspegel und die Bitfehlerrate des vom Handy gesendeten Datenstroms an der Basisstation gemessen werden und in Abhängigkeit der Qualität dieser Empfangsparameter wird der erforderliche Sendepiegel für das Handy bestimmt und dem Handy durch die Basisstation vorgegeben. Diese Regelungsprozedur ist Bestandteil der GSM-Norm.

Somit stehen für Messungen die Pegelregelungswerte aus zwei verschiedenen Quellen zur Verfügung: Direkt durch Auslesen der Werte aus dem Handy mittels spezieller Software und indirekt durch Messungen am SAR-Messkopf. Dadurch können Werte verglichen und validiert werden.

Messaufbau und Steuer-Software

Der Messaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei wird ein Laptop zur zentralen Datenverwaltung und -bearbeitung eingesetzt. Hieran angeschlossen ist ein GPS-Empfänger, der SAR-Messkopf ESM-120 der Fa. Maschek GmbH und das Mobiltelefon auf dem eine Netzmonitorsoftware installiert ist, die die Netzdaten ausliest.

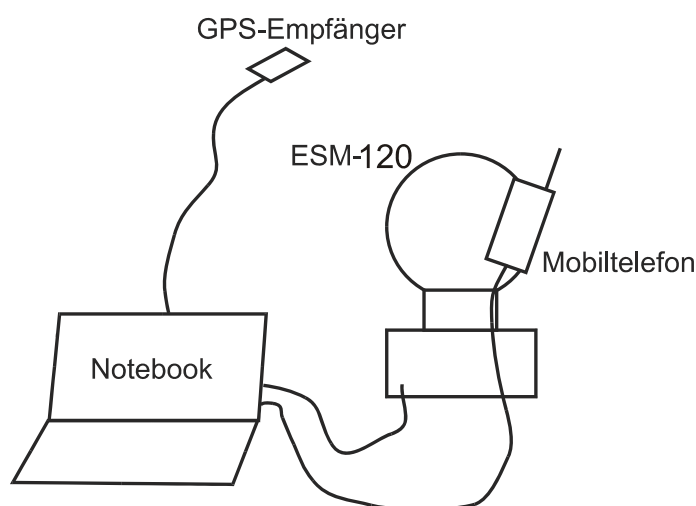


Abbildung 3: Versuchsaufbau für den Versuch „Fahrt mit dem Auto“

Es wurde ein für das Forschungsvorhaben entwickeltes Programm implementiert, das im Sekundentakt die GPS-Koordinaten, den gemittelten SAR-Wert, den Spitzen-SAR-Wert und den Netzmonitor des Mobiltelefons ausliest. Dabei werden u. a. folgende Netzdaten gespeichert:

- Empfangskanal
- Empfangsfeldstärke
- Sendeleistungswert (Power-Control-Level)
- Steuerkanäle der Nachbarzellen

Dabei ist der Sendeleistungswert (Power-Control-Level) die wichtigste Information, da dieser unmittelbar mit dem verursachten SAR-Wert zusammenhängt.

Mit der für das Projekt weiterentwickelten Software können gleichzeitig folgende Messdaten aufgenommen, gespeichert und später weiterverarbeitet werden:

- Empfangsfeldstärke des unregelmäßig und mit maximaler Leistung abstrahlenden BCCH-Kanals der Basisstation,
- Empfangspegel des vom Mobilteil genutzten Gesprächskanals,
- den von der Basisstation dem Handy vorgegebenen Sendepiegel,
- die Feldstärke der Nachbarstationen, die vom Mobilteil empfangen und für eventuelle Zellwechsel ausgewertet werden,
- Qualitätsparameter der Übertragungsstärke,
- die ungefähre Entfernung zur Basisstation (errechnet aus der Signallaufzeit),
- und weitere Parameter, wie z. B. unterschiedliche Netzkenndaten, die fallweise für die Auswertung hinzugenommen werden,
- die Ortskoordinaten, die zeitlich parallel mit einem GPS-Empfänger aufgenommen werden,
- die Darstellung der Fahrt in einer Topographischen Karte und
- die SAR-Messdaten des SAR-ESM 120-Messkopfes.

Alle diese Daten können für 4 verschiedene Mobiltelefone (davon z.B. 2 mit Helixantennen und 2 mit Planarantennen) gleichzeitig aufgezeichnet werden.

4.4 Berechnungsverfahren

Das eingesetzte Messverfahren in Verbindung mit dem SAR-Messkopf ESM-120 der Fa. Maschek GmbH gestattet im Prinzip eine direkte Messung von SAR-Werten z. B. als Funktion des Ortes und der Zeit bei einer Messfahrt. Allerdings muss betont werden, dass diese SAR-Messungen zwar dazu geeignet sind, relative Pegelschwankungen aufzuzeigen, jedoch kann eine SAR-Bestimmung nach Norm nicht erfolgen. Die Norm EN 50360 in Verbindung mit EN 50361 [3] fordert z. B. den Einsatz eines sog. SAM-Phantoms (*specific anthropomorphic mannequin*), das sich in der Geometrie deutlich von der Kugelform des SAR-Messkopfes ESM-120 unterscheidet. Außerdem befindet sich im SAR-Messkopf die Sonde an einem fest vorgegebenen Ort, die Aufnahme des Feldes über den Ort und die anschließende Suche des Maximums der über 10 g Gewebe gemittelten SAR-Werte ist nicht möglich.

Aus diesem Grund ist die Vorgehensweise im Projekt die Anwendung der Messtechnik, um Grunddaten während der alltäglichen Nutzung von Handys zu erfassen, wie typische Haltung und Position (über Videoaufzeichnung), typische tatsächlich auftretende Sendeleistungen (Protokollierung bei Messfahrten) etc.

Die letztendlich resultierenden SAR-Werte werden durch Rechnung ermittelt.

Da für eine vorgegebene Konfiguration mit definierter Frequenz, Position, Geometrie sowie festgelegten Gewebeparametern zwischen der Sendeleistung und dem SAR-Wert ein linearer Zusammenhang besteht, kann über Berechnungsverfahren unter Einhaltung der Normbedingungen ein solcher Proportionalitätsfaktor abgeleitet werden, der dann quasi zur Korrektur der mit dem nicht normgerechten SAR-Messkopf ermittelten SAR-Werte herangezogen werden kann.

4.4.1 Auswahl des Berechnungsverfahrens

Die in Betracht kommenden Berechnungsverfahren können in zwei Klassen eingeteilt werden, in die quellenbasierten und in die feldbasierten Verfahren. Eine Übersicht über Feldberechnungsverfahren im Hinblick auf die Bestimmung von SAR-Werten wurde vom Teil-Auftragsnehmer EMSS in [18] vorgestellt. Prinzipiell eignen sich die Verfahren FDTD (*Finite Difference Time Domain*), FIT (*Finite Integration Technique*), FEM (*Finite Element Method*), TLM (*Transmission Line Matrix Method*) sowie MoM (*Method of Moments*) zur numerischen Behandlung von Fragestellungen der Dosimetrie (d.h. Bestimmung von Feldverteilungen und SAR-Werten) unter Zugrundelegung einer beliebigen Geometrie.

Es gibt diverse kommerzielle Programmsysteme, die jeweils eines oder mehrere der genannten Verfahren umsetzen, z. B. XFDTD bzw. SemCad (FDTD), Microwave Studio (FIT), HFSS bzw. Ansys (FEM), FEKO (MoM mit Hybridmethoden).

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Entscheidung zugunsten des Feldberechnungsprogramms FEKO [19] getroffen, welches auf der MoM basiert, aber auch schon in einer intern nutzbaren Entwicklungsversion die Kombination von MoM und FEM anbietet (siehe z. B. [20]). Die Gründe für diese Auswahl sind im Wesentlichen:

- Gerade für die Modellierung von metallischen Antennenstrukturen bietet die MoM im Vergleich zu FDTD oder FEM Vorzüge in Bezug auf die Komplexität des Modells und der Genauigkeit. Man denke nur z. B. an eine Helixantenne, die mit der MoM problemlos modellierbar ist, für FDTD oder FEM jedoch ganz spezielle Erweiterungen erfordert.
- Für homogene dielektrische Objekte (z. B. SAM-Phantom) eignet sich die MoM in Verbindung mit einer Oberflächenstrommodellierung (siehe z. B. [21]). Im Vergleich zu den üblicherweise eingesetzten Stufenapproximationen der FDTD erhält man bei der Nachbildung von gekrümmten Flächen durch die MoM eine bessere Nachbildung gekrümmter Oberflächen.
- Für die hier vorliegende Fragestellung spielen die Kriterien bezüglich Rechenzeit und Speicherplatz eine untergeordnete Rolle. Bezüglich der reinen Modellierung eines Kopfes (kein Ganzkörper) bis zum Frequenzbereich von UMTS weisen alle der genannten Verfahren einen auf modernen Computersystemen akzeptablen Aufwand auf. Erst bei größeren Berechnungen, wie z. B. der Analyse eines Ganzkörperphantoms mit einer Basisstationsantenne, kommen derartige Gesichtspunkte zum Tragen und bedeuten ein Ausschluss-Kriterium für einige der aufgezählten Verfahren.
- Zweifelsohne ein sehr gewichtiger Grund der Anwendung von FEKO im Rahmen dieses Projektes ist die Tatsache, dass es sich einerseits um ein kommerzielles Programmsystem handelt und sich somit von vielen rein universitären Programmen im Hinblick auf Anforderungen bezüglich der Bedienbarkeit (CAD-Schnittstellen, Fehlerkontrolle etc.), der Stabilität und Genauigkeit sowie der Validierung unterscheidet. Andererseits ist EMSS als Teil-Forschungsnehmer dieses Projektes auch gleichzeitig Entwickler von FEKO, was vielfältige Möglichkeiten eröffnet. So sind z. B. alle Schnittstellen offen und es können interne Erweiterungen vorgenommen

werden, die die Bearbeitung dieses Projektes deutlich vereinfachen. Dies soll anhand der für dieses Projekt essentiellen SAR-Berechnungen verdeutlicht werden: Jedes Feldberechnungsprogramm (und so auch FEKO) sollte in der Lage sein, elektrische Nahfelder an jedem Ort in einem verlustbehafteten Gebiet zu berechnen. Die normkonforme SAR-Bestimmung erfordert dann jedoch ein aufwändiges Nachbearbeiten: Es müssen über würfelförmige Gebiete gemittelte SAR-Werte gebildet werden, und dann muss noch über einen nicht trivialen Optimierungsprozess eine Suche nach dem Maximum erfolgen. In früheren Arbeiten des Teil-Auftragnehmers, z. B. [22], [23], [24] und [25], wurde dieser Schritt auch als separates Nachbearbeiten, basierend auf einem regulären Gitter mit Felddaufpunkten, durchgeführt. Aufgrund der Möglichkeit, auf interne FEKO-Strukturen zuzugreifen, wurden neuerdings die zur SAR-Bestimmung notwendigen Mittelungs- und Optimierungsalgorithmen direkt in den Rechenkern eingebaut (verfügbar ab FEKO Suite 4.2 vom Juni 2004).

Die bereits genannten Literaturstellen beinhalten zahlreiche Validierungsbeispiele zu FEKO, die zeigen, dass eine genaue SAR-Bestimmung möglich ist. Nachfolgend sollen deshalb nur zwei einfache Anordnungen betrachtet werden. Das erste Beispiel ist in Abbildung 4 gezeigt. Es handelt sich um eine ebene Welle, die auf eine homogene dielektrische Kugel einfällt. Der Vorteil dieser einfachen Anordnung ist, dass eine exakte Lösung als Referenz existiert. Für das Nahfeld entlang der z-Achse ist in Abbildung 5 diese exakte Lösung den MoM und MoM/FEM Lösungen aus FEKO gegenübergestellt. Man erkennt eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Ein Vergleich mit Messungen wurde für die Anordnung nach Abbildung 6 durchgeführt. Eine einfache Dipolantenne mit Symmetrierglied strahlt unterhalb einer mit körperäquivalenter Flüssigkeit gefüllten Plexiglasschale, und in drei verschiedenen Höhen wird über Messungen (Sonde mit Linearverschiebeeinheit) bzw. über Berechnungen mit FEKO die elektrische Feldstärke ermittelt. Der Vergleich ist in Abbildung 7 zu sehen.

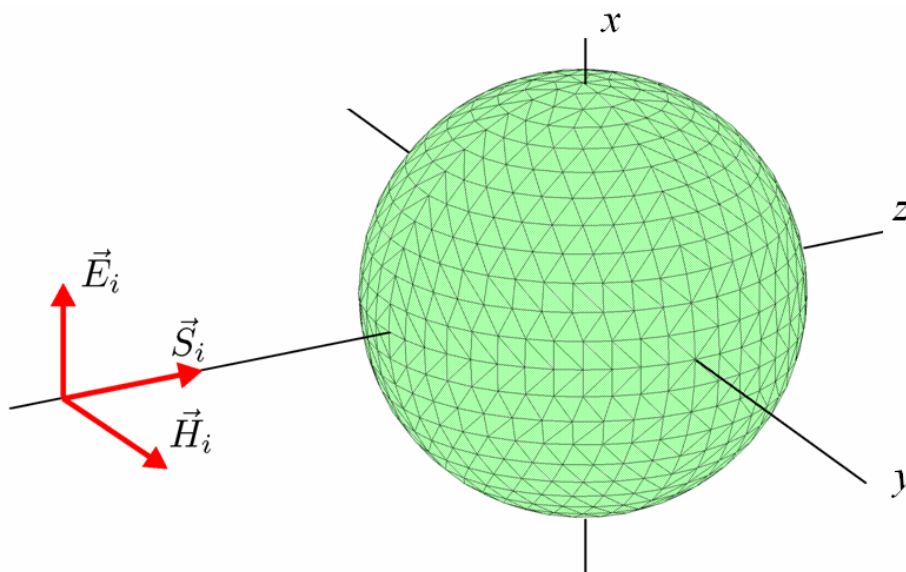


Abbildung 4: Einfall einer ebenen Welle auf eine homogene dielektrische Kugel mit $\epsilon_r = 4$, $\beta R = 1.2$ (d.h. $\beta_0 R = 1.2$ oder $\lambda_0 = 10.472 R$).

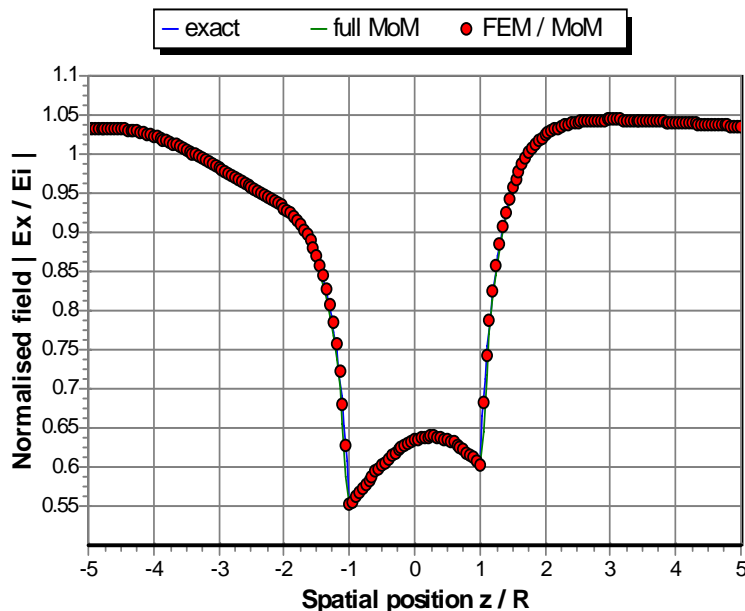


Abbildung 5: Verlauf des elektrischen Nahfeldes entlang der z -Achse innerhalb und außerhalb der Kugel aus Abbildung 4.

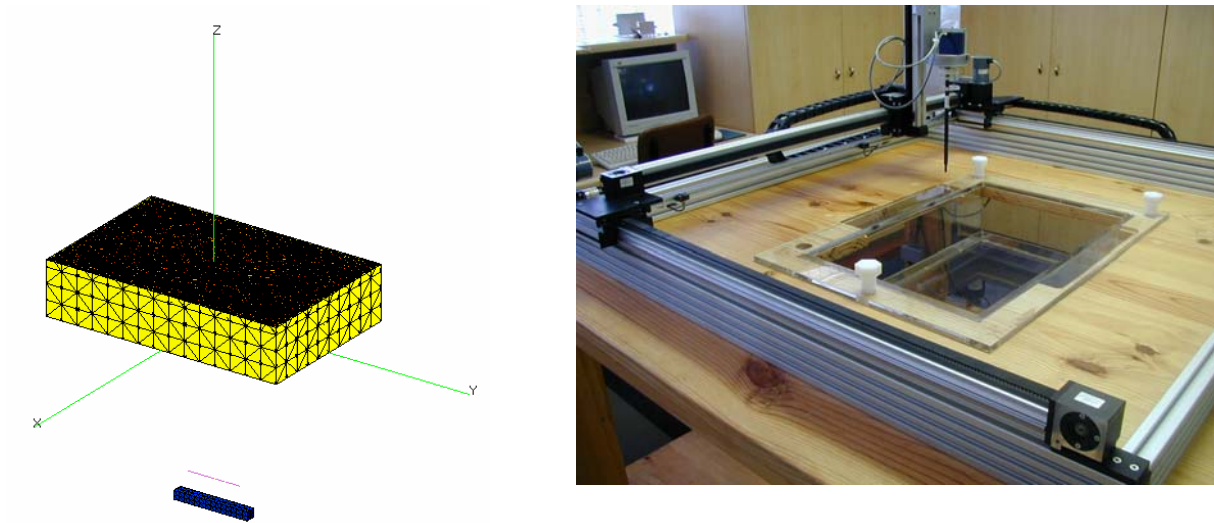


Abbildung 6: Dipolantenne mit Symmetrierglied unterhalb einer mit körperäquivalenter Flüssigkeit gefüllten Plexiglasschale: Berechnungsmodell (links) und Messaufbau (rechts).

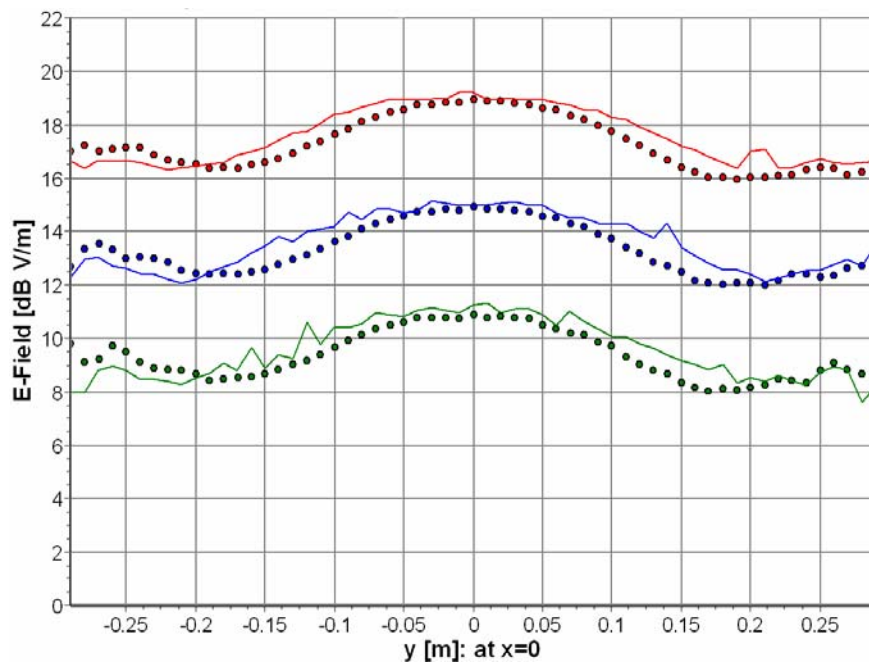


Abbildung 7: Vergleich der Messwerte (Linien) mit den Berechnungsergebnissen (Punkte) für drei verschiedene Höhen für die Anordnung nach Abbildung 6.

4.5 Bewertende Literaturübersicht einschließlich der Eignung der unterschiedlichen Verfahren für die Projektdurchführung

Das Ziel des Projekts ist die Untersuchung der realen Exposition durch den Gebrauch von Mobiltelefonen. Auch wenn der maximale SAR-Wert eines Telefons leicht gemessen werden kann und die Verfahren hierzu bereits genormt sind, so ist die Bestimmung der realen Exposition im alltäglichen Gebrauch sehr schwierig. Der Hauptgrund hierfür liegt darin, dass die Basisstation die Ausgangsleistung des Telefons regelt. So hängt die momentan eingestellte Sendeleistung nicht nur von der Empfangsfeldstärke – genauer von der Bitfehlerrate - auf Seiten der Basisstation ab, sondern auch von den Regelalgorithmen der Netzbetreiber. Auf welche Leistung geregelt wird, hängt des Weiteren auch von dem Mobiltelefon selber ab. Ist das Abstrahlverhalten der Telefonantenne schlecht, so muss die Basisstation die Leistung hochregeln, um einen ausreichenden Empfang zu bekommen.

Im TCO'01-Standard [26] wird daher die Telephone Communication Power (TCP) und die passende Messprozedur hierfür definiert. Nach TCO'01 kann die maximal abgestrahlte Leistung in Anwesenheit des Benutzerkopfes gemessen werden. Eine hohe TCP bedeutet, dass ein hoher Anteil der Strahlungsleistung in den Freiraum abgestrahlt wird, und dadurch ein hoher Empfangspegel bei der Basisstation entsteht und diese die Ausgangsleistung des Telefons herunterregeln kann, was zu einer Reduzierung des SAR-Wertes führen würde. In der Zeitschrift „Connect“ wurde hierzu ein Strahlungsfaktor definiert [27]. Dieser setzt den SAR-Wert bei maximaler Sendeleistung zu der 'effektiven Strahlungsleistung' aus [27] ins Verhältnis.

Der Strahlungsfaktor lässt eine Aussage zu, inwiefern das Telefon an der realen Exposition beteiligt ist. Für die letztendliche Bestimmung des SAR-Wertes beim alltäglichen Gebrauch sind jedoch Messungen in einem üblichen Umfeld notwendig. In [2] wurde mit besonderen Mobiltelefonen die von der Basisstation vorgegebene Leistung während eines Gangs durch Paris und dessen Vororte aufgezeichnet und schließlich ausgewertet. In [28] wurden Probanden spezielle, software-modifizierte GSM-Mobiltelefone übergeben. Über einen einmonatigen Zeitraum mit insgesamt knapp 6 Stunden summierter Telefonnutzungszeit wurde die prozentuale Verteilung der einzelnen Leistungsstufen ermittelt.

Es gibt nur diese beiden voranstehenden erwähnten praxisbezogenen Untersuchungen, so dass hier noch Handlungsbedarf bestand. Dieses Projekt untersucht erstmalig in Deutschland und unter den hier vorhandenen Rahmenbedingungen die SAR-Werte bei alltäglichen Nutzungsbedingungen.

Im Rahmen dieses Projekts, werden daher die SAR-Werte für verschiedene Alltagssituationen untersucht. Dabei werden zunächst die verschiedenen Szenarien untergegliedert, z. B. in Telefonate während einer Fahrt im Zug oder im Auto und in Telefonate während eines Fußmarsches und in Telefonate in einem Zimmer.

Hieraus ergeben sich verschiedene Erfordernisse.

Um zu nachvollziehbaren Ergebnissen zu kommen, ist bei einer Zug- oder Autofahrt parallel zur Messung der Telefonsendeleistung und des SAR-Werts auch die GPS-Position aufzuzeichnen. Für die SAR-Messungen wird das SAR-Messsystem ESM-120 der Fa. Maschek als geeignet erachtet. Durch die parallel laufenden Videoaufzeichnungen kann die Positionierung

des Telefons am Kopf nachvollzogen werden, so dass durch anschließende rechnerische Simulation mit dem Feldberechnungsprogramm FEKO der SAR-Wert zusätzlich berechnet wird.

Das Programm FEKO beinhaltet das Hybridverfahren Momentenmethode-Finite-Elemente-Methode [29], so dass zum einen der menschliche Kopf und zum anderen das Mobiltelefon in geeigneter Weise modelliert werden können. Das Feldberechnungsprogramm kommt auch bei weiteren Situationen, wie z. B. *'Telefonate in einem Raum'* zum Einsatz. Hierbei geht es darum, die Telefoniergewohnheiten verschiedener Probanden (Mann, Frau, Kind) in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Das SAR-Messsystem kann hier nicht eingesetzt werden. Stattdessen wird das Telefonat auf Video aufgezeichnet, so dass die Szenarien anschließend für die Feldberechnung nachgestellt werden können, um die SAR-Werte während des Telefonats zu bestimmen. Abschließend können zu den verschiedenen Szenarien die Auftrittswahrscheinlichkeiten für die SAR-Werte angegeben werden. Dabei kann z. B. unterschieden werden zwischen dem Benutzer (Mann, Frau, Kind) oder zwischen dem Aufenthaltsort (Autofahrt, Zugfahrt, Fußmarsch, Zimmer). Dies ermöglicht eine auch für Laien verständliche Darstellung und Wertung der Ergebnisse.

4.5.1 Ergänzende Literaturbewertung während der Projektlaufzeit zu dem Themenkreis "Leistungsregelung eines GSM-Mobiltelefons"

In [30] wird mittels softwaremodifizierten GSM-Mobiltelefonen das Sendeleistungs-Regelverhalten von Mobiltelefonen unter realen Bedingungen untersucht. Zusätzlich werden Daten, die von den Netzbetreibern geliefert wurden, für einen Vergleich hinzugezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein hoher Prozentsatz der Mobilfunkgespräche mit maximalen Sendeleistungswerten erfolgt. Ein derartiges Verhalten ist primär bedingt durch häufige Zellwechsel, die von der Basisstation gesteuert werden, um die Kommunikationsgüte zu optimieren. Die Untersuchung wurde durchgeführt, um für epidemiologische Studien Aussagen treffen zu können, mit welchen mittleren Sendeleistungswerten bei den Telefonaten zu rechnen ist.

In [31] wird die Leistungsregelung eines GSM-Mobiltelefons unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Mit einem Mobiltelefon (Sagem OT 76M) werden die GSM-Signalisierungsdaten der Luftschnittstelle über die im Mobiltelefon vorhandene Schnittstelle in einen Laptop ausgelesen. Anhand dieser Daten und den GPS-Koordinaten werden entlang eines Messweges Parameter wie Sendeleistung, Empfangspegel und jeweils eingebuchte Basisstation aufgezeichnet.

Die Auswertung erbrachte, dass die Regelungsmöglichkeit, die die GSM-Technik bietet, nur teilweise voll von den Netzbetreibern genutzt wird. Durch Zellwechsel und Hochregelung bei nicht optimalen Empfangsbedingungen sind die mittleren Sendeleistungen höher als erwartet.

Ausgangspunkt für die Untersuchung von [32] war die Überlegung, dass die Mobiltelefonate, die in Gebieten mit einer hohen Anzahl von Basisstationen geführt werden, theoretisch eine geringere mittlere Sendeleistung verwenden müssten als Mobiltelefone, die in z. B. ländlichen Gebieten mit einer größeren Entfernung zur Basisstation verwendet werden. Hierzu wurde die Sendeleistungsverteilung bei Mobiltelefonen in vier verschiedenen Gebieten mit unter-

schiedlicher Bevölkerungsdichte untersucht. Die Daten wurden nicht aus dem Mobiltelefon ausgelesen, sondern es wurden die in der Basisstation des Netzbetreibers vorhandenen Informationen aus vier verschiedenen Gebieten (ländlicher Raum, Kleinstädte, Vorstadtbereich und Innenstädte) in Schweden ausgewertet. Die Untersuchungen erstreckten sich auf GSM 900 und auf GSM 1800.

Das Ergebnis der Auswertung zeigte, dass in ländlichen Gebieten die höchste Leistungsstufe in ungefähr 50 % der Zeit verwendet wurde, während die niedrigste Leistungsstufe nur in 3 % verwendet wurde. Die vergleichbaren Zahlen für den Innenstadtbereich waren 25 % und 22 %. Aus diesen Ergebnissen folgert Lönn folgendes: In ländlichen Gebieten, in denen die Basisstationen weiter entfernt sind, ist der Sendeleistungspegel im Durchschnitt höher als in dicht besiedelten Gebieten.

Die quantitative Bewertung der individuellen Belastung durch elektromagnetische Felder ist für epidemiologische Studien wichtig, daher könnte die regionale Verteilung der Telefonate ein wichtiger Parameter für die Strahlungsbelastungs-Abschätzung sein.

Die schwedische TCO Development hat in dem Dokument "TCO '01 Mobile Phones' [26] ihre Kriterien für die Zertifizierung von Mobiltelefonen dargelegt.

TCO Development ist eine Tochter der TCO (schwedischer Gewerkschaftsdachverband für Angestellte und Beamte). Die Tätigkeit von TCO Development wird zur Gänze durch die von den Herstellern zu entrichtenden Zertifizierungsgebühren finanziert. TCO sieht sich als erstes Qualitäts- und Umweltgütesiegel für Mobiltelefone mit spezifizierten Anforderungen in den Bereichen Emissionen, Ergonomie und Ökologie. In die Zertifizierung geht u. a. der SAR-Wert ein, der nach der standardisierten Messmethode ermittelt wird. Darüber hinaus hat TCO den TCP-Wert (Telephone Communication Power; nachstehend im Text noch erläutert) eingeführt, der die Signalstärke des Telefons angibt. Erreichen die Signale des Mobiltelefons die Basisstation mit hoher Stärke, benötigt es nur eine niedrige Leistung; dies bedeutet, dass der Benutzer weniger Strahlung ausgesetzt wird.

Ein möglichst niedriger SAR-Wert und ein möglichst hoher TCP-Wert ergeben nach TCO die beste Kombination. Die Richtwerte nach TCO '01 Mobile Phones betragen für den SAR-Wert maximal 0,8 Watt/Kilogramm und für den TCP-Wert mindestens 0,3 Watt. Auf dem Markt hat sich die TCO-Zertifizierung jedoch noch nicht durchgesetzt.

Die Testmethode ist in der Anlage zu dem TCO '01 Mobile Phones beschrieben. Die Messungen werden in einer Modenverwirbelungskammer mit zwei je nach Frequenz unterschiedlichen Kopfphantomen, eins für 900 MHz und eins für 1800 MHz, durchgeführt. Mit drei orthogonalen Antennen werden die elektromagnetischen Felder gemessen. Die Mobiltelefone werden in fünf verschiedenen Positionen in freiem Abstand vom Phantom, in rechter und linker Wangenposition und rechter und linker abgewinkelter Position gemessen. Die Wangenposition und die abgewinkelte Position sind dieselben wie sie in EN50361 für SAR-Messungen definiert sind. Es wird ein Basisstationssimulator verwendet, der sich außerhalb der Messkammer befindet, und der eine in der Messkammer befindliche Antenne über ein Koaxial-Kabel speist.

TCP (Telephone Communication Power) ist definiert als die Leistung, die eine umschließende Fläche durchdringt, die das Telefon und das Kopfphantom enthält. TCP ist die maximal verfügbare Leistung, die das Telefon abstrahlen kann, wenn die Antenne ideal an die Ausgangsimpedanz des Telefons angepasst ist, abzüglich der Leistung, die aufgrund der

tatsächlichen Fehlanpassung an dem Antennenfußpunkt reflektiert wird, abzüglich der Leistung, die in der Antenne bei der Abstrahlung in Wärme umgewandelt wird, abzüglich der Leistung, die in dem Kopfphantom absorbiert wird.

TCP ist ein Qualitätswert für das Telefon während des Sendebetriebs. Je höher der TCP-Wert, desto besser wird das Telefon im Sendemodus abstrahlen. Auf der anderen Seite wird die mögliche Strahlungsbelastung durch die Specific Absorption Rate (SAR) charakterisiert, die so niedrig wie möglich und unterhalb des standardisierten Grenzwertes von 2 W/kg liegen muss (bei TCO '01 wird ein SAR-Wert von 0,8 W/kg gefordert). Sowohl der TCP-Wert als auch der SAR-Wert sind proportional der Leistung, die das Telefon abstrahlen kann. Daher – so fordert TCO – muss ein qualitativ hochwertiges Telefon einen guten Kompromiss zwischen einem hohen TCP-Wert und einem niedrigen SAR-Wert aufweisen. Dies ist möglich, wenn die Abstrahlung des Telefons nicht in den Kopf erfolgt.

Zum Vergleich der Strahlungsemission von unterschiedlichen Handys hat TCO in [33] 25 verschiedene am schwedischen Markt erhältliche Handy-Modelle (GSM) getestet, um festzustellen, ob sie die von TCO propagierte Zertifizierung in "TCO'01 Mobile Phones" enthaltenen Anforderungen hinsichtlich Strahlung (Emissionen) und Ergonomie erfüllen.

TCO versucht, die eigene Zertifizierung in der Öffentlichkeit publik zu machen in der Hoffnung, dass die Endgeräte-Hersteller eine entsprechende entgeltpflichtige Zertifizierung durchführen lassen. Im Bereich der Computer-Bildschirme hat sich eine TCO-Zertifizierung durchgesetzt, im Bereich der Mobilfunk-Endgeräte noch nicht. So war keiner der Hersteller oder Mobilfunk-Netzbetreiber bereit, an TCO Handys für diesen Test zu liefern. Daraufhin beschaffte TCO die Handys selbst, um die Tests durchzuführen. Von den 25 getesteten Geräten erfüllten sechs Geräte die von TCO festgelegten Bedingungen. TCO definiert einen TCP-Wert (Mittelwert von vier gemessenen Handy-Positionen), der für jeden Frequenzbereich der Mobiltelefone (900 MHz bzw. 1800 MHz) mindestens 0,3 Watt beträgt. Welche Sendeleistung das Handy benötigt, hängt von der Stärke des Signals ab, das die Sendestation erreicht. Je höher der TCP-Wert des Handys ist, desto stärker ist normalerweise das Signal, das die Basisstation erreicht, und desto besser kann das Handy die Sendeleistung nach unten regeln, damit die Strahlung, der der Benutzer ausgesetzt wird, reduziert wird. Ein gutes Handy – nach TCO 01 – sollte deshalb einen niedrigen SAR-Wert und einen hohen TCP-Wert aufweisen.

Die Zeitschrift 'connect' [27] verwendet in ihren Handyttests die Begriffe der "effektiven Sendeleistung" und des "Strahlungsfaktors".

Die "effektive Sendeleistung" ermittelt die Zeitschrift 'connect' in der 'Testfactory Stuttgart'.

Zitat aus 'connect': "Das Handy wird dazu an einen künstlichen Kopf montiert, anschließend simuliert eine Antenne in einer von Strahlen aus der Umwelt weitgehend abgeschirmten Kabine die Basisstation. Eine weitere Antenne misst die effektiv vom Handy abgegebene Sendeleistung. Die absorbierende und reflektierende Wirkung des Kunstkopfes mindert diese Sendeleistung in der Regel erheblich, da der Kopf Strahlung absorbiert und reflektiert, die dann nicht mehr für den eigentlichen Zweck, nämlich die Funkverbindung, zur Verfügung steht. Das heißt: Die effektive Sendeleistung ist bereits um den Einfluss des künstlichen Kopfes bereinigt." Ende Zitat.

Da eine gesundheitliche Gefährdung bei Einhaltung der Grenzwerte nicht nachgewiesen ist, verzichtet die Zeitschrift 'connect' auf eine Bewertung der gesundheitlichen Gefährdung. Stattdessen setzt die Redaktion den SAR-Wert und die "effektive Strahlungsleistung" am künstlichen Kopf in Korrelation zueinander. Den daraus resultierenden SAR-Sendeleistungsfaktor ermittelt die Zeitschrift 'connect' für die jeweiligen Testhandys. Bei diesem Ranking liegen Handys vorn, die einen niedrigen SAR-Wert aufweisen und über hohe effektive Sendeleistung verfügen – also Sendeleistung, die für die Kommunikation mit der Basisstation zur Verfügung steht und nicht vom Kopf absorbiert wird oder durch ein schlecht konstruiertes Handy verloren geht. Die Zeitschrift 'connect' empfiehlt, bei der Auswahl eines Handys nicht ausschließlich den SAR-Wert zu berücksichtigen, sondern auch eine hohe effektive Sendeleistung. Der Grund: Hat das Handy schlechte Sendeeigenschaften, wird es von der Basisstation des Handynetzes angewiesen, in eine höhere Sendeleistungsstufe zu wechseln.

5. GSM-Messungen

5.1 Messfahrten

Telefonate beim Fahren mit dem Zug und dem Auto in städtischen und ländlichen Regionen (viele schnelle Zellwechsel und viele unterschiedliche Feldversorgungswerte)

5.1.1 Messfahrten mit PKW

Für die SAR-Messungen bei den Autofahrten wurde folgender Messaufbau verwendet:

- ein Mobiltelefon, dessen Sendeleistungspegel ausgelesen und aufgezeichnet wurde,
- ein GPS-Empfänger, der die Positionsdaten zeitgleich zu den Messwerten lieferte,
- ein Messkopf des Typs Maschek ESM 120. Der Messkopf wurde im Fahrzeug auf dem Beifahrersitz erhöht angebracht, so dass sich die Messeinrichtung auf der Kopfhöhe eines fiktiven Beifahrers befand.

Hinweis: Der Messkopf ermittelt – wie bereits beschrieben - keinen SAR-Wert entsprechend der Norm, jedoch ermöglicht der Einsatz dieses Messkopfes eine Übersichtsmessung der zeitaktuellen Einstrahlungswerte.

DTX-Regelverhalten

In einem GSM-System sendet das Handy gepulst, dies bedeutet, dass während einem Gespräch dem Handy 1/8 der gesamten Zeit für die Übertragung zur Verfügung steht. Der DTX-Modus ermöglicht es, dass in Sprechpausen dieser Zeitrahmen nur zu einem kleinen Teil (etwa 13 %) genutzt wird, da keine Sprachinformation übertragen werden muss.

Damit bei einer Messfahrt – auch bei aufgebauter und bestehender Sprachverbindung – das Handy nun in den künstlichen Zustand der "permanenten Sprachübertragung" gesetzt wird, wurde das Handy mit einer permanenten Hintergrundgeräuschkulisse durch das Autoradio beschallt. Eine gleichmäßige Geräuschquelle (akustisches Rauschen) hätte nicht gereicht, den DTX-Modus aufzuheben, denn der DTX-Regelalgorithmus ist so ausgefeilt, dass ein gleichmäßiger Lärm-Rausch-Hintergrund als solcher erkannt wird und nicht übertragen wird. Aus diesem Grunde wurde das Handy mit Sprachsignalen aus dem Autoradio und noch aus einem zusätzlichen tragbaren Radio beschallt.

Die Messfahrten wurden durch Videoaufzeichnungen dokumentiert.

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt diesen Messaufbau, bestehend aus Mobiltelefon, Messkopf und der Haltekonstruktion im Auto.

Die Nutzung des Mobiltelefons bei einer Autofahrt ist für den Fahrer nur mit einer Freisprecheinrichtung erlaubt, und damit sind die SAR-Werte, die bei der Nutzung des Handys am Kopf gemessen sind, für den Fahrer nicht relevant, sondern kämen nur für den Beifahrer in Betracht.



Mobiltelefon
Nokia 6110



Messkopf ESM-120



Installation im Auto

Abbildung 8: Messaufbau für Messfahrten mit Kfz

Der Laptop wurde im Beifahrerfußraum platziert. Der Messkopf wurde auf den Beifahrersitz gestellt. Beim KFZ handelte es sich um eine Limousine ohne Schiebedach. Das verwendete Mobiltelefon Nokia 6110 war mit kurzer Monopolantenne ausgestattet und besitzt einen SAR-Wert von $0,87 \text{ W / kg}$.

5.1.1.1 Ergebnisse des ersten Messzyklus (eine Messfahrt mit PKW) vom Mai 2004

Der Versuch fand in einem der D-Netze (D-Netzbetreiber 2) statt. Die Fahrt begann am Komplex der Universität Stuttgart/Vaihingen, der außerhalb des Stadtzentrums liegt. Angesteuert wurde das Zentrum von Stuttgart. Nach Erreichen der Innenstadt wurde ein größerer Bogen im Stadttinneren gefahren und die Stadt am südlichen Ende Richtung Degerloch (Stuttgarter Fernsehturm) wieder verlassen. Am Fernsehturm wurde für 5 min gehalten (Kontrolle des Messaufbaus) und die Fahrt dann in Richtung Stuttgart/Plieningen fortgesetzt. Nach Durchfahren des Orts wurde auf die Autobahn aufgefahren, dann bis zum Autobahnkreuz Stuttgart weitergefahren und von dort zurück zur Universität Stuttgart/Vaihingen.

Abbildung 9 zeigt die gefahrene Strecke in GPS-Koordinaten. Die Fahrt erfolgte im Uhrzeigersinn. Handover-Punkte (Basisstationswechsel) sind als rote Kreise gekennzeichnet. Der obere Bogen befindet sich in der Stadt, die Fahrt vom Fernsehturm aus nach Plieningen war Landstrasse und der Bogen von Plieningen zurück zur Universität Stuttgart/Vaihingen war eine Autobahnstrecke.

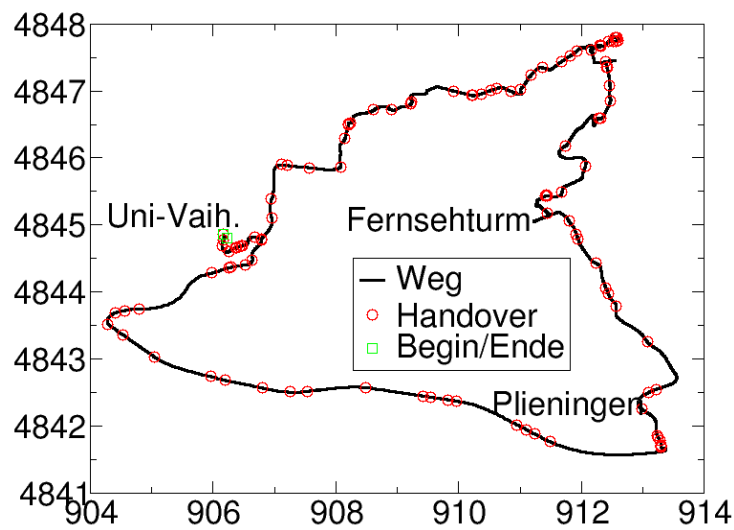


Abbildung 9: Wegstrecke in GPS-Koordinaten und Zellwechsel (Handover-Punkte)

Die Messungen zeigen deutlich, dass in der Stadt wesentlich öfter Zellwechsel-Ereignisse vorkommen, als auf dem Land.

Bei jedem Zellwechsel regelt die Leistungsregelung der Basisstation das Mobilteil auf den maximal möglichen Sendeleistungswert (hier 2 Watt). In Abbildung 10 ist die Leistungsregelung des Mobilteils bei den Zellwechseln (mit "◇" gekennzeichnet) gut zu erkennen.

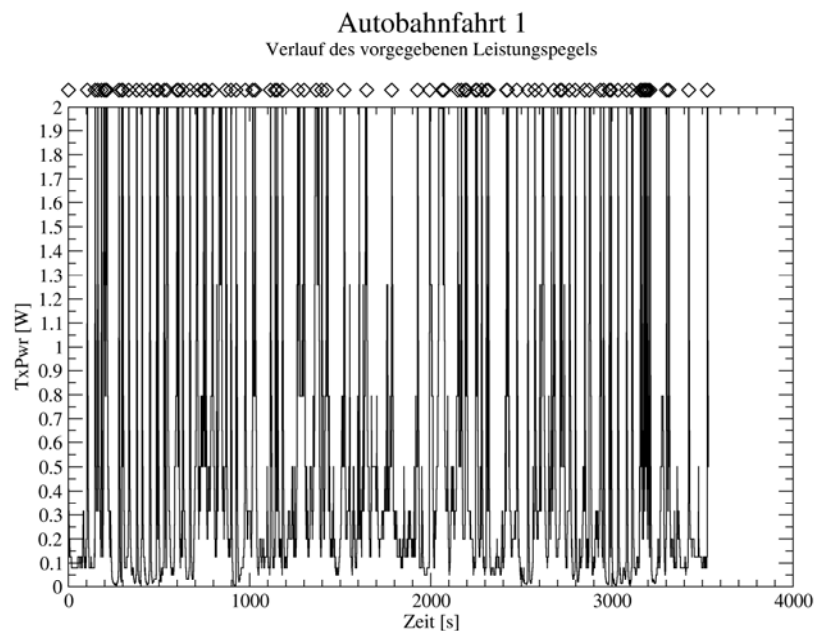


Abbildung 10: Sendeleistungspegel als Funktion der Messfahrt

Mit der eingesetzten Software kann auch im Rahmen einer D-Netz-Messfahrt festgestellt werden, ob ein mit GSM 1800 versorgter Bereich eines D-Netzbetreibers durchfahren wird. (Da die D (900 MHz)-Netzbetreiber auch GSM 1800-Frequenzen zugeteilt erhielten, finden sich GSM 1800-Frequenzen der D-Netzbetreiber auch in den Stadtbereichen.)

In Abbildung 11 ist ein solcher GSM 1800-Bereich des D-Netzbetreibers, der bei der Messfahrt durchfahren wurde, gut zu erkennen. In diesen GSM 1800-Bereichen beträgt die maximal mögliche Sendeleistung des Mobilfunkendgerätes 1 Watt, im Gegensatz zu den GSM 900-Bereichen, in denen ein maximaler Sendeleistungswert von 2 Watt für das Handy (siehe auch Abbildung 10) vorgesehen ist.

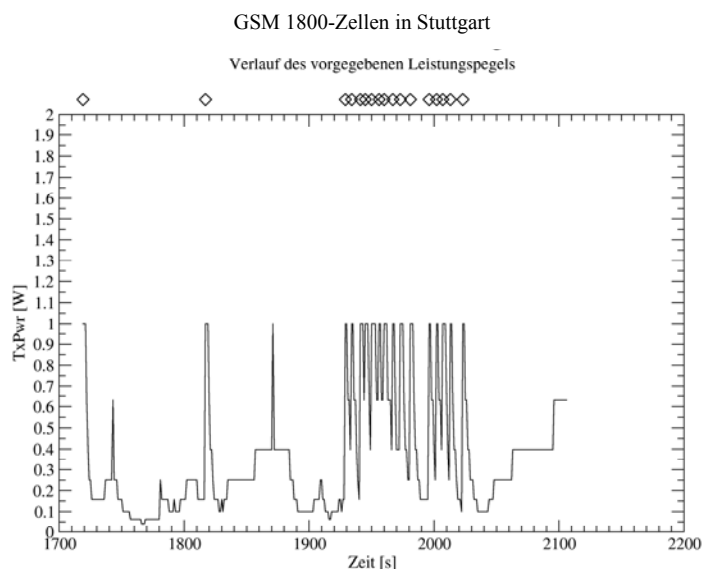


Abbildung 11: GSM 1800-Zellen eines D-Netz (900 MHz)-Netzbetreibers

Aus untenstehender Abbildung 12 ist zu erkennen, dass bei der Messfahrt eine hohe Zahl von Zellwechseln auch ohne eine Ortsveränderung erfolgte; das Fahrzeug wartete bei Rot an der Ampel. Dennoch erfolgten sozusagen 'im Stand' ca. 15 Zellwechsel.



Abbildung 12: Gefahrenre Strecke seit dem letzten Zellwechsel als Funktion der Zeit

5.1.1.2 Ergebnisse des zweiten Messzyklus (4 Messfahrten mit PKW) im Juli 2004

Die Abbildung 13 zeigt eine Messfahrt in einem GSM 900 Netz über eine Strecke von ca. 100 km; 50 km für die Hinfahrt und 50 km für die Rückfahrt.

Der SAR-Wert wurde als Funktion der Weglänge aufgezeichnet und man erkennt recht gut eine Symmetrie für Hin- und Rückfahrt, d. h. am vergleichbaren Ort erscheinen ähnliche SAR-Werte.

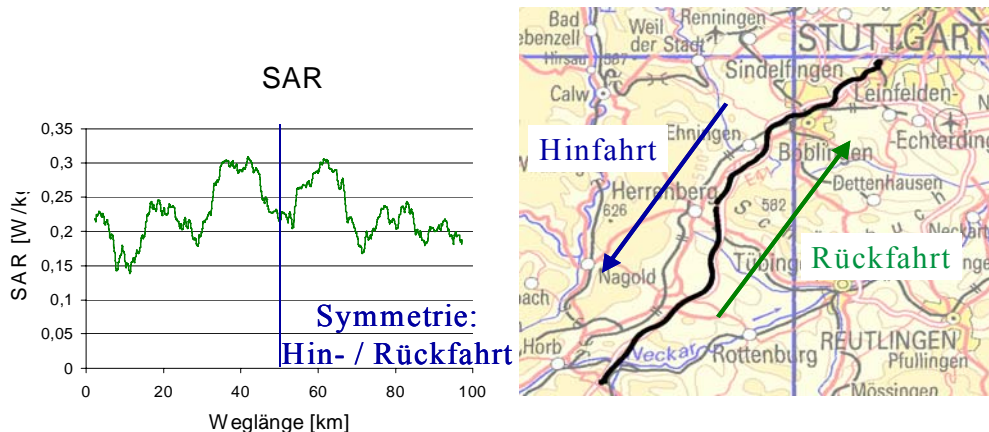


Abbildung 13: SAR-Wert entlang einer Überland-Messfahrt

In Abbildung 14 wird der Zusammenhang zwischen SAR (spezifische Absorptionsrate) und Sendeleistung dargestellt. Die mittlere Sendeleistung wie auch SAR, Empfangspegel und Ortskoordinaten wurden über einen Zeitraum von 6 Minuten gemittelt, wobei berücksichtigt wurde, dass das Handy nur in 1/8 der gesamten Zeit sendet.

Abbildung 14 zeigt einen sehr guten Zusammenhang zwischen SAR-Wert und der Sendeleistung des Handys bezogen auf den gleichen Ort. Bei allen diesen Messungen wurden – wie bereits anfangs erwähnt – die Handys permanent derartig beschallt, so dass die DTX-Regelung nicht greift. Hätte der DTX-Modus während der Hälfte der Zeit angesprochen, so wäre die linke Kurve (SAR) um einen Faktor von ca. 0,6 ($\frac{1+0,13}{2} \approx 0,6$) reduziert worden, da das Handy in der einen Hälfte der Zeit nur noch mit dem reduzierten Wert gesendet hätte.

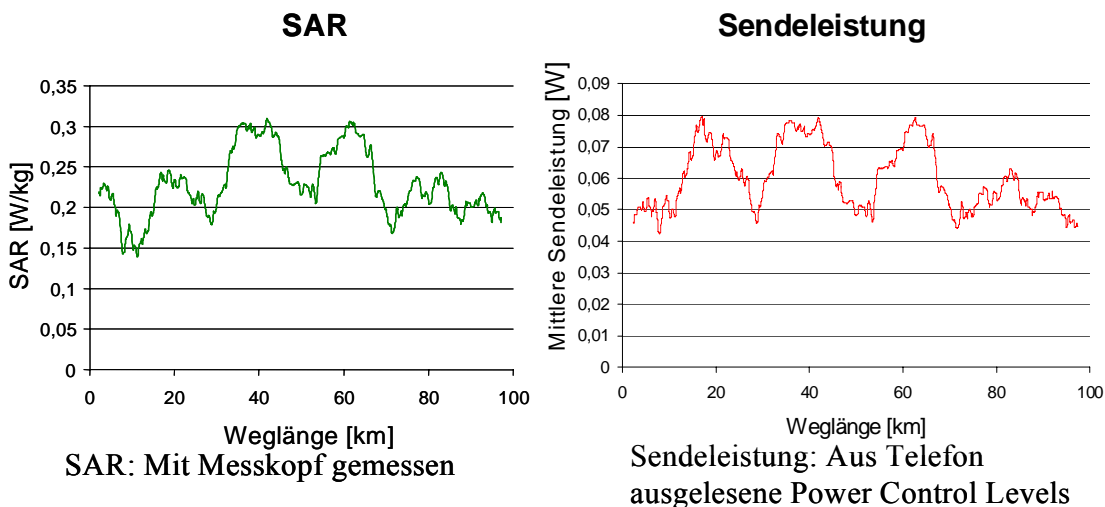


Abbildung 14: Zusammenhang von gemitteltem SAR-Wert und gemittelter Sendeleistung

Die nachstehenden beiden Grafiken (Abbildung 15 und Abbildung 16) zeigen eine weitere Fahrt, hier durch einen GSM-versorgten Tunnel. In Abbildung 15 (rechts) erkennt man, dass bei der Einfahrt in den Tunnel das Handy sich in die "Tunnelzelle" einbucht und dann ausgehend von den 2 Watt Sendeleistung nach dem Zellwechsel auf die im Tunnel erforderliche geringe Sendeleistung herunterregelt. Am Ende des Tunnels, d. h. nach Ende der Tunnelzelle, bucht sich das Handy wieder in eine normale Zelle ein.

In der kleinen Grafik links in der Abbildung 16 erkennt man die der Straße zugeordneten Zellen. Es findet immer eine gewisse "Zellverschleppung" statt, d. h. das Handy bucht sich immer erst zu einem späten Zeitpunkt in die neue Zelle ein. Bei der Rückfahrt (Fahrt in Gegenrichtung) würde der Zellwechsel daher nicht an den gleichen Stellen stattfinden, jedoch, das haben unsere Messungen gezeigt, finden Einbuchungen auch bei der Fahrt in Gegenrichtung in der Regel in die gleichen Zellen statt.

In der Abbildung 16 zeigt das Foto rechts die Einfahrt in den Tunnel. In der Videodokumentation zu diesem Projekt sieht man das Videobild und die in das Videobild eingespiegelten SAR-Werte bzw. teilweise auch den Sendepiegel und auch die Bitfehlerrate.

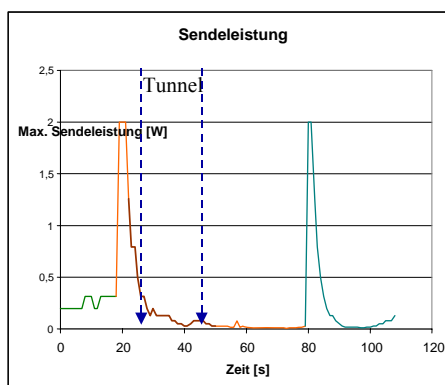
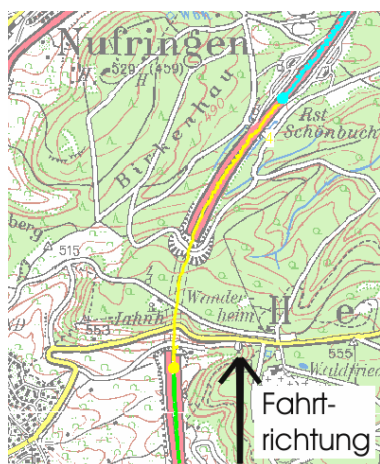


Abbildung 15:
Fahrt durch Tunnel mit Zellwechsel (Karte und Diagramm)

Abbildung 16: Fahrt durch Tunnel mit Zellwechsel (Karte und Foto)



In Abbildung 17 sind die SAR-Werte entlang einer weiteren Fahrtstrecke, die sich aus mehreren Stadt- und Überlandfahrten zusammensetzt, aufgetragen. Es zeigt sich, dass trotz der häufigen Zellwechsel die gemittelten SAR-Werte in und um Städte niedriger sind, als in Teilgebieten außerhalb der Städte.

Selbst – und das soll an dieser Stelle ausdrücklich betont werden – an den Orten, an denen höhere SAR-Werte auftreten, in der Grafik orange markiert, sind die SAR-Werte noch unterhalb der zulässigen Werte. Durch die Radio-Beschallung wurde das Handy in einen permanenten Sendezustand für den ihm im Kanal zustehenden Zeitschlitz gesetzt; der DTX-Modus wurde dadurch aufgehoben. In der Realität (Sprechen und Zuhören gleichverteilt) wären die SAR-Werte nur ca. halb so hoch wie hier aufgetragen.

(Würde ein Handynutzer nur zuhören und nie sprechen, so würde der SAR-Wert auf das ca. 0,13fache sinken, da aufgrund des DTX-Modus nur noch eine reduzierte Zahl von Rahmen übertragen wird.)

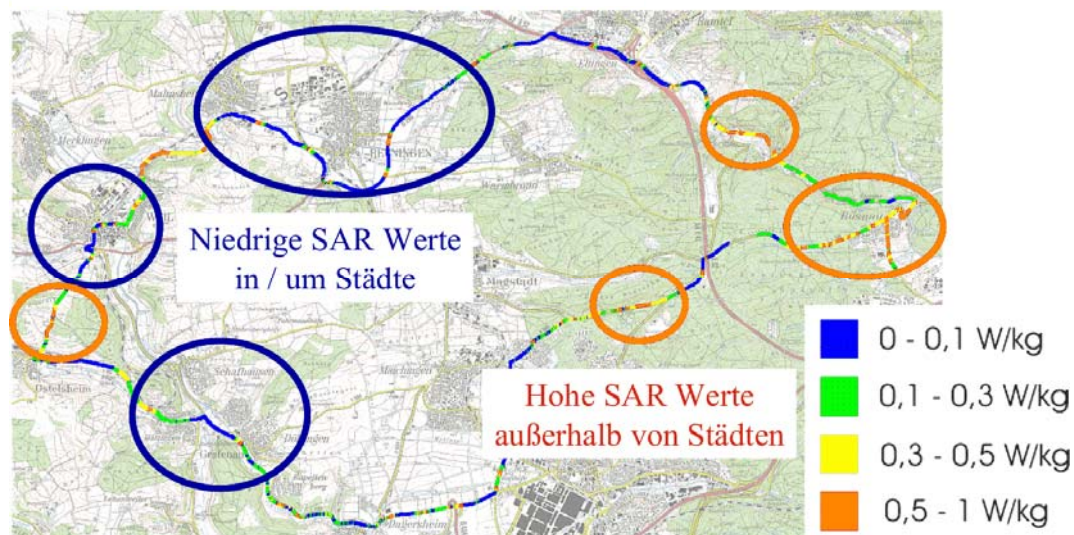
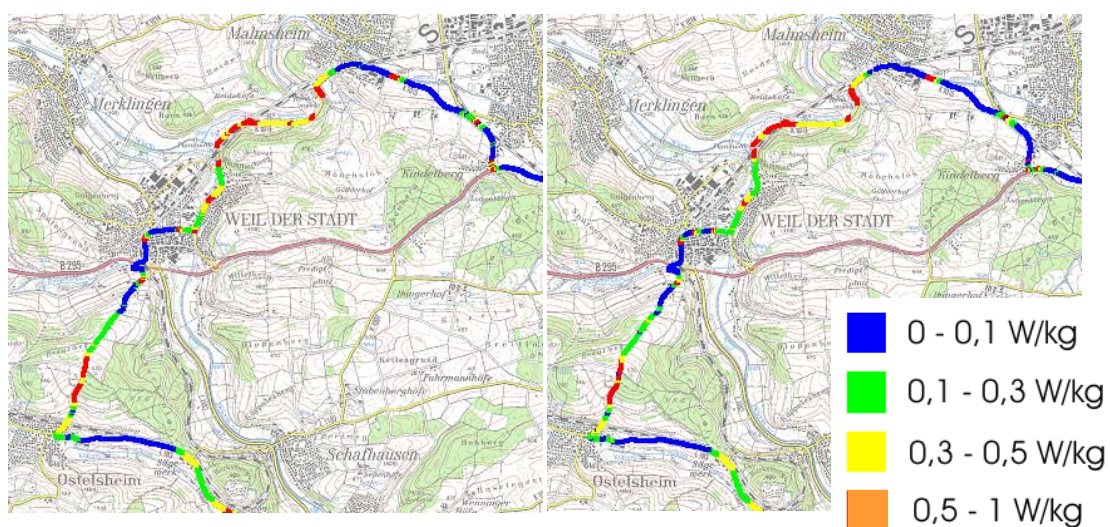


Abbildung 17: SAR-Werte entlang einer weiteren Überland-Fahrtstrecke

Die nachfolgende Abbildung 18 zeigt den Vergleich zweier Messfahrten, die in derselben Richtung durchgeführt wurden. Die Messwerte an vergleichbaren Orten sind sehr ähnlich. Dies müsste eigentlich nicht sein, denn die Empfangsbedingungen können sich von Minute zu Minute ändern; die Zelle, bei der sich das Handy einbucht, kann bei der nächsten Fahrt eine andere sein, und dennoch ist die Reproduzierbarkeit, wie die beiden Messfahrten zeigten, sehr hoch.



Messfahrt am Mi, 7.7.2004

Messfahrt am Do, 8.7.2004

Abbildung 18: Vergleich zweier Messfahrten

5.1.1.3 Auswertung der fünf PKW-Messfahrten

In Tabelle 2 sind die statistischen Mittelwerte (gemittelt über 6 Minuten) der fünf Messfahrten aufgetragen, und zwar nach den Kriterien:

- SAR-Wert (aus dem Messkopf ausgelesen),
- Sendeleistung (berechnet aus dem Sendeleistungspegel, der dem Handy von der Basisstation vorgegeben wird, ausgelesen aus dem Handy); die Sendeleistung ist noch nicht durch 8 (8 Zeitschlitze pro Funkkanal) geteilt; eine weitere Reduzierung durch DTX entfällt, da aufgrund der Radiobeschallung DTX inaktiv ist,
- Empfangspegel (aus dem Handy ausgelesener Empfangspegel des Kommunikationskanals),
- Anzahl der Handover (Zellwechsel, ausgelesen aus dem Handy) und
- Handover pro Minute, d. h. Zellwechsel pro Zeiteinheit (errechnet) und
- Handover pro Kilometer, d. h. Handover pro Strecke (errechnet), hier spielt dann die gefahrenen Geschwindigkeit keine Rolle mehr.

Die Tabelle 2 zeigt, dass der – wie bereits erwähnt nicht normgerecht ermittelte - SAR-Wert bei Überland- und Autobahnfahrten ca. 1/10 des Grenzwertes beträgt, und bei Stadtfahrt ca. 1/20 des Grenzwerts und dies bei deaktiviertem DTX-Modus.

Im Realbetrieb wären die Werte daher um ca. die Hälfte reduziert.

Ein Zellwechsel findet bei den Autobahnfahrten ca. pro Kilometer einmal statt, während bei der Stadtfahrt ein Zellwechsel alle 300 Meter stattfindet. Dies zeigt gut, dass die in den Städten erforderliche Kapazität in den Mobilfunknetzen durch eine hohe Zahl von Basisstationen erreicht wird.

Für die Stadtfahrt, die am Anfang im Teilkapitel 5.1.1.1 beschrieben wurde und in Abbildung 9 dargestellt ist, wurde der Bereich der Innenstadt von Stuttgart zusätzlich getrennt ausgewertet. Die dort vorhandene besonders hohe Zelldichte ist im direkten Vergleich mit den Daten für die gesamte Fahrt anhand des Faktors Handover pro Kilometer gut erkennbar.

	Fahrdauer [h:min]	Weglänge [km]	Mittelwert SAR [W/kg]	Standardabweichung des SAR-Wertes [W/kg]	Mittelwert der maximalen Sendeleistung [W]	Standardabweichung der Sendeleistung [W]	Mittlerer Empfangspegel [dBm]	Standardabweichung des Empfangspegels [dBm]	Anzahl Handover	Handover pro Minute	Handover pro Kilometer
Überlandfahrt 7.7.2004	1:01	51,024	0,27	0,28	0,48	0,56	-57	-45	67	1,1	1,31
Überlandfahrt 8.7.2004	1:04	51,024	0,24	0,26	0,48	0,56	-57	-43	73	1,1	1,43
Autobahnfahrt 7.7.2004	0:59	99,145	0,23	0,24	0,48	0,56	-58	-42	89	1,5	0,90
Autobahnfahrt 8.7.2004	0:57	99,145	0,23	0,25	0,48	0,56	-59	-42	95	1,7	0,95
Stadtfahrt 25.5.2004 nur Innenstadt	0:36	14,745	0,12	0,20	0,40	0,48	-58	-48	55	1,5	3,73
Stadtfahrt 25.5.2004 komplett	1:13	48,611	0,15	0,23	0,50	0,62	-58	-48	119	1,6	2,4

Messungen beim selben D-Netzbetreiber

- Autobahn- / Überlandfahrt: GSM 900
- Stadtfahrt (Innenstadt): 77% GSM 900, 23% GSM 1800

Tabelle 2: Statistische Mittelwerte (mit Standardabweichungen bei den fünf Messfahrten)

Erläuternde Informationen zur Definition der Standardabweichung einer Messreihe einschließlich des Beispiels an drei unterschiedlichen Messkurven findet sich in Kapitel 12.1 auf Seite 126.

Dort findet sich auch eine Erläuterung zur Angabe der statistischen Größen der Empfangsleistung in dBm. Entsprechend der Definition von dBm kann die Größe "Standardabweichung" auch einen negativen Wert annehmen, wenn die Standardabweichung in "dBm" ausgedrückt wird.

5.1.2 Messfahrten im Zug

Obwohl man zunächst vermutet, dass keine signifikanten Unterschiede auftreten, ob sich ein Mobilfunkteilnehmer mit dem Auto oder im Zug bewegt, gibt es bei genauerer Betrachtung dennoch sehr unterschiedliche Rahmenbedingungen.

Im Gegensatz zu Autobahnen, die ein bevorzugtes Versorgungsziel der Netzbetreiber darstellen, sind viele Bahnstrecken entweder unterversorgt oder gar nicht versorgt. Die Bahnreisenden wurden noch nicht als interessante Klientel der Mobilfunknetzbetreiber entdeckt. Erst in den letzten Jahren wurde von einigen Netzbetreibern verstärkt begonnen, die Mobilfunkversorgung auch für Bahnreisende zu verbessern.

Eine schlechte Versorgung, die mit hohen Pfaddämpfungen, bedingt durch die Entfernung zur nächsten Basisstation, einhergeht, erfordert in der Regel eine hohe Sendeleistung auf der Seite des Mobilfunkteilnehmers. Die neuen Hochgeschwindigkeitszüge erreichen Geschwindigkeiten, die in aller Regel auf der Straße nicht möglich sind, dies bedeutet, dass Mobilfunkzellen in relativ kürzeren Abständen als bei Autofahrten gewechselt werden müssen, wodurch die Ausgangsleistung des Mobilteils während des Gesprächs bei einem Handover zur nächsten Zelle für kurze Zeit jeweils auf den Maximalwert geregelt wird.

Insbesondere auf den Hochgeschwindigkeitstrassen, aber auch auf anderen Bahnstrecken, sind Tunnels Bestandteil der Strecke. Da diese in der Regel nicht mit einem Repeater bzw. einer Mobilfunkbasisstation ausgerüstet sind, bricht ein Gespräch häufig ab. Zusammen mit der - verglichen mit der Autobahn - schlechteren Versorgung treten Gesprächsabbrüche sehr viel häufiger auf als bei Autofahrten. Hinzu kommt, dass die Dämpfung deutlich höher ist als im Auto, daher sind auch höhere Sendeleistungen zu erwarten.

Um den Bahnreisenden dennoch zu ermöglichen, aus dem fahrenden Zug Gespräche oder Datenverbindungen aufzubauen, hat die Bahn einzelne ICE-Wagen mit Repeatern ausgerüstet, die das Sendesignal des Mobiltelefons verstärken und über eine Außenantenne abstrahlen. Ebenso wird die Basisstation über diese ICE-Repeaterantenne empfangen und über eine Repeaterinnenantenne innerhalb des Wagens abgestrahlt, so dass die faradaysche Abschirmung des Wagens und die der bedampften Fenster umgangen wird.

Die im Folgenden vorgestellten Messungen wurden in einem solchen ICE Repeaterwagen auf der Strecke von Stuttgart nach Hannover durchgeführt.



Abbildung 19 (in etwa maßstabsgerecht):

- links: Nokia 8210 Dualband GSM 900 und 1800 (angegebener SAR-Wert von 1 W/kg),
- rechts: Nokia 6150 Dualband GSM 900 und 1800 (angegebener SAR-Wert von 0,69 W/kg)

Zugfahrt Stuttgart – Hannover, am 14.3.2005

Fahrplan der DB AG für ICE 670

Stuttgart Hbf 14.03.05 ab 09:27

Mannheim Hbf ab 10:07

Frankfurt(M) Flughafen Fernbf ab 10:42

Frankfurt(Main)Hbf ab 10:58

Kassel-Wilhelmshöhe ab 12:22

Göttingen ab 12:42

Hannover Hbf 14.03.05 an 13:16



Abbildung 20: Herr Baumann (IHF-Stuttgart) mit dem für den ersten Teil der Fahrt verwendeten Messaufbau

Abbildung 20 zeigt den für den ersten Teil der Messfahrt verwendeten Messaufbau, bestehend aus dem Messkopf der Firma Maschek GmbH, einem Fujitsu-Siemens Notebook, einem Nokia 8210-Telefon (blau, in Abbildung 20 links auf Batterie aufgeständert stehend; Dualband für GSM 900 und GSM 1800 mit einem SAR-Wert von 1 W/kg), einem Nokia 6110 (liegend, blau; Einbandgerät für GSM 900; das Nokia 6110 ist auf Seite 33 in der Abbildung 8 dargestellt, SAR-Wert: 0,87 W/kg) und einem Nokia 6150 (liegend, rot; Dualband für GSM 900 und GSM 1800; das Nokia 6150 ist auf Seite 42 in der Abbildung 19 rechts dargestellt, für das Nokia 6150 ist ein SAR-Wert von 0,69 W/kg angegeben).

Auf den insgesamt drei Etappen der Strecke wurden bis zu vier Telefone in zwei unterschiedlichen Netzen eingesetzt:

1. Stuttgart – Frankfurt Hbf:
 - Nokia 6110, Netzbetreiber 2 (D-Netz)
 - Nokia 6150, Netzbetreiber 4 (E-Netz) (beinhaltet je nach Freischaltung auch eine Option für ein Roaming zu einem Netzbetreiber im D-Netz)
2. Frankfurt – Kassel:
 - Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)
 - Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz)
 - Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)
 - Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz)
3. Kassel – Göttingen:
 - Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)
 - Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)
 - Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz)

Während der gesamten Fahrt wurde der SAR-Wert mit Hilfe des Messkopfes aufgezeichnet, an dem jeweils ein Nokia 6110 (bis Fankfurt) bzw. 6150 (ab Frankfurt) befestigt war. Aufgrund der Nähe der anderen Telefone ist es jedoch nicht auszuschließen, dass auch deren Sendeleistungen das Messergebnis beeinflusst haben.

Bei den Messungen, insbesondere auf dem ersten Teil der 1. Etappe, gab es einige Softwareabstürze, so dass die Messungen wegen des notwendigen Systemneustarts für einige Minuten unterbrochen werden mussten.

1. Etappe (Stuttgart bis Frankfurt Hauptbahnhof)

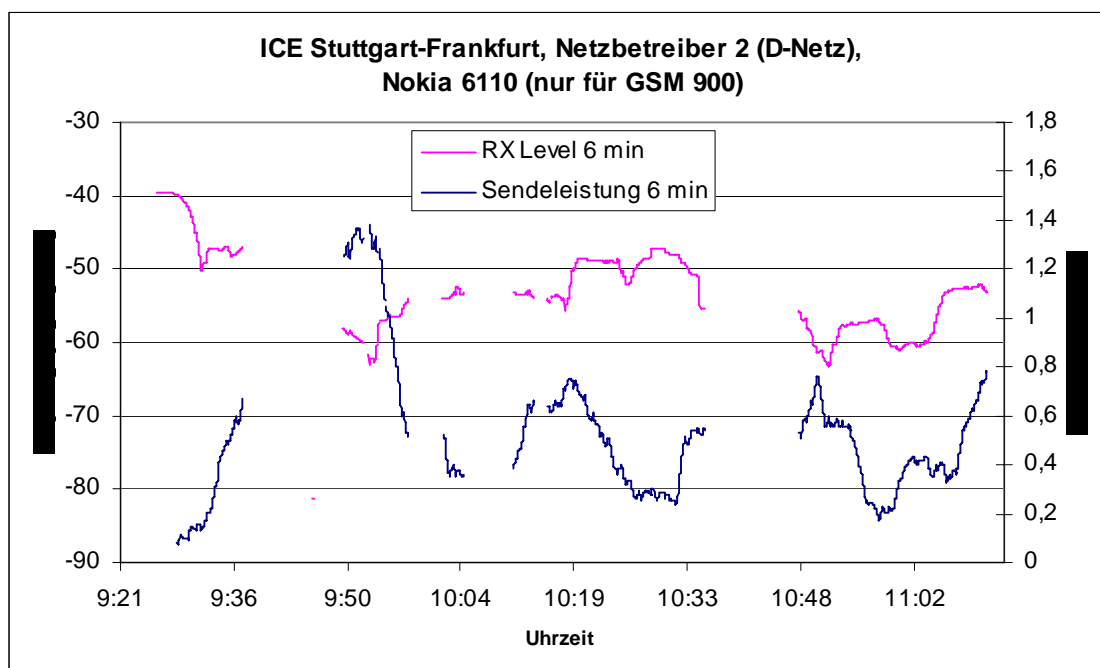


Abbildung 21: Diagramm aus Empfangspegel (RX-Level), gemittelt über 6 Minuten und maximaler Sendeleistung, ebenfalls gemittelt über 6 Minuten, als Funktion der Zeit für einen Netzbetreiber im D-Netz; ICE Stuttgart-Frankfurt

In Abbildung 21 ist die Korrelation aus Empfangspegel und maximaler Sendeleistung (beide Größen jeweils über 6 Minuten gemittelt) gut zu erkennen. Am Beginn der Strecke Stuttgart-Frankfurt war eine gute Netzversorgung vorhanden. Dies führte zu einer niedrigen Sendeleistung des Mobilfunkhandys.

Die leeren Stellen im Diagramm ergaben sich aufgrund der Kommunikationsabbrüche, die sowohl durch teilweise nicht versorgte Tunnelstrecken als auch nicht versorgte freie Strecken entstanden sind.

Insgesamt ist auf der Strecke Stuttgart-Frankfurt eine recht gute Kommunikation in diesem GSM 900-Netz möglich.

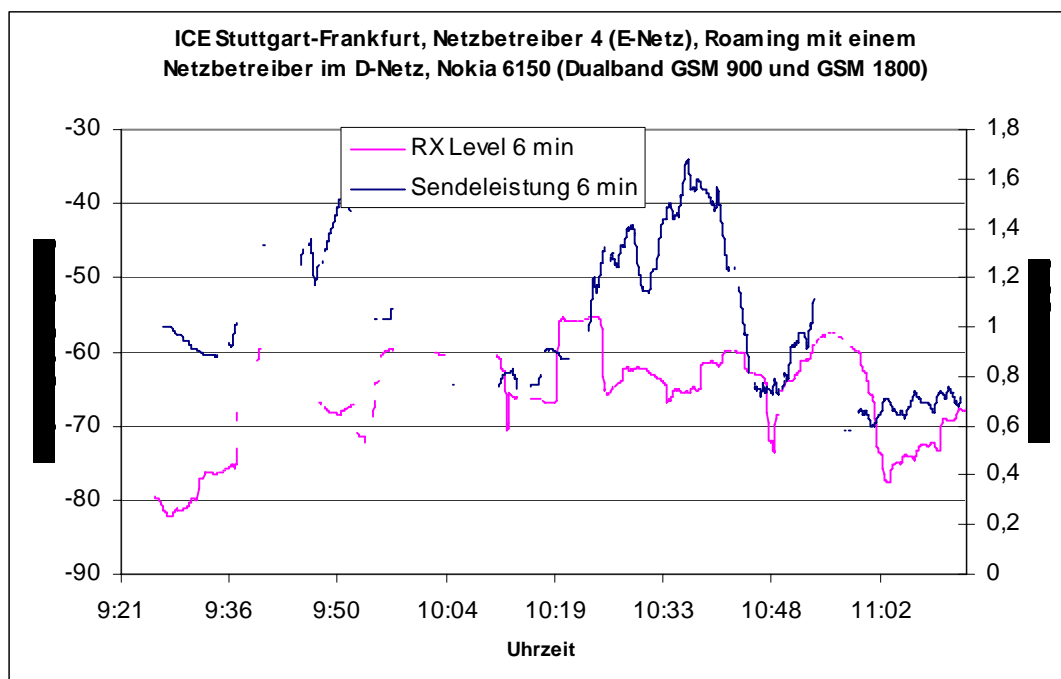


Abbildung 22: Diagramm aus Empfangspegel (RX-Level), gemittelt über 6 Minuten und maximaler Sendeleistung, ebenfalls gemittelt über 6 Minuten, als Funktion der Zeit für einen Netzbetreiber im E-Netz mit D-Netz-Roaming; ICE Stuttgart-Frankfurt

Abbildung 22 zeigt das Diagramm aus Empfangspegel und maximaler Sendeleistung (beide jeweils gemittelt über 6 Minuten), aufgetragen über die Zeit, diesmal für einen E-Netz-Betreiber. Der E-Netz-Betreiber verfügt über ein Roaming-Abkommen mit einem D-Netz-Betreiber, so dass bei fehlender Feldversorgung sich das Handy ins D-Netz einbucht. Die Monitordaten zeigten, dass das Telefon größtenteils im Roaming-Verfahren im D-Netz arbeitete, der Empfangspegel ist relativ hoch, wenn auch nicht so hoch wie in Abbildung 21. Der gute Empfangspegel ist auch dadurch gegeben, dass alle Messungen in einem mit Repeater versorgten Wagen stattfanden.

Unterbrechungen, wie auch in Abbildung 21, sind bedingt durch fehlende Versorgung und teilweise auch durch Software-Abstürze.

2. Etappe (Frankfurt bis Kassel)

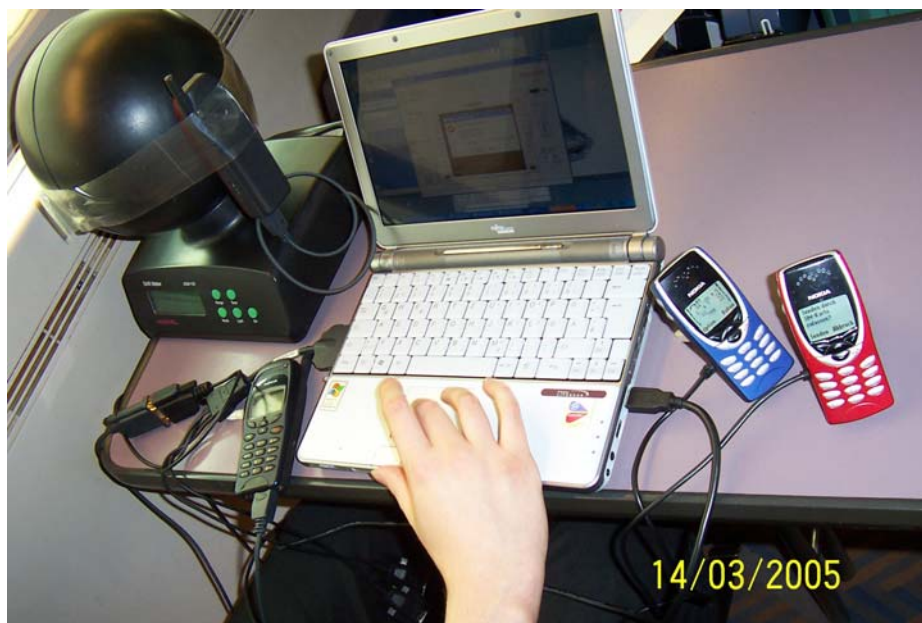


Abbildung 23: Messaufbau bestehend aus Fujitsu-Siemens Notebook, zwei Nokia 8210 Telefonen (rechts des Laptops), einem Nokia 6150 (links des Laptops) und einem Nokia 6150 (an dem SAR-Messkopf befestigt)

Abbildung 23 zeigt den ab Frankfurt verwendeten Messaufbau. Die beiden farbigen Nokia 8210-Telefone und das an dem Messkopf befestigte Nokia 6150 und ein weiteres Nokia 6150 auf dem Tisch freiliegend, wurden für diese Messungen verwendet. Durch eine Schnittstellenvervielfacherkarte waren die Handys an den Laptop angeschlossen.

An dem Maschek-Messkopf ist die Befestigung des Handys zu erkennen. Je nachdem, wie und an welcher Stelle das Handy an den Messkopf befestigt wird, zeigt die im Messkopf befindliche, fest angebrachte Sonde einen höheren oder niedrigeren SAR-Wert an. Die Abtastung durch den Maschek-Messkopf erfolgt nur an einem einzigen Punkt, so dass die absolute Höhe des Maschek-SAR-Wertes abhängig von der Anbringung ist. Ist das Handy einmal befestigt, so ist jedoch die Relation der anschließend gemessenen SAR-Werte zueinander korrekt.

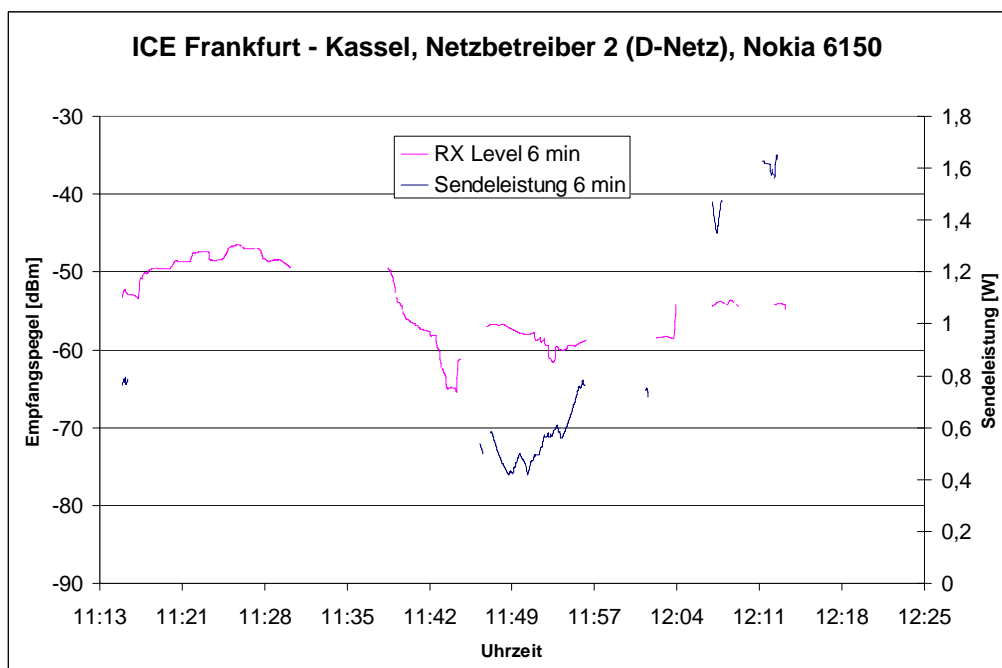


Abbildung 24: Diagramm aus Empfangspegel (RX-Level), gemittelt über 6 Minuten und maximaler Sendeleistung, ebenfalls gemittelt über 6 Minuten, als Funktion der Zeit für einen Netzbetreiber im D-Netz; ICE Frankfurt-Kassel

Abbildung 24 zeigt die Messdaten für die Strecke Frankfurt-Kassel. Hier ist sehr gut zu erkennen, dass größere Unterbrechungen in der Netzversorgung vorhanden waren.

Wegen der geringen Gesprächsaufbauwahrscheinlichkeit (definiert als erfolgreich aufgebaute Gespräche geteilt durch die Anzahl der Versuche) ist die Strecke als schlecht versorgt anzusehen. Dies führt zu einem höheren Sendeleistungspegel. Der Empfangsleistungspegel kann hier nur bedingt als Kriterium für die Qualität der Versorgung herangezogen werden. Zum einen ist er, bedingt durch den Repeaterwagen, durchweg relativ hoch und nicht mit Messungen, z. B. beim Telefonieren im Auto, zu vergleichen. Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass der Empfangspegel, der während eines Telefonats aufgezeichnet wird, ein dynamisch geregelter Wert ist. Der Empfangsleistungspegel, der in Abbildung 21 dargestellt ist, liegt zwar ebenfalls im Bereich von -50dBm, jedoch ist davon auszugehen, dass die Basisstation ihre Sendeleistung heruntergeregelt hat, da eine Versorgung des Mobiltelefons mit dieser geringeren Leistung ausreichend ist - was dann aber dazu führt, dass der am Handy gemessene Empfangspegel geringer wird.

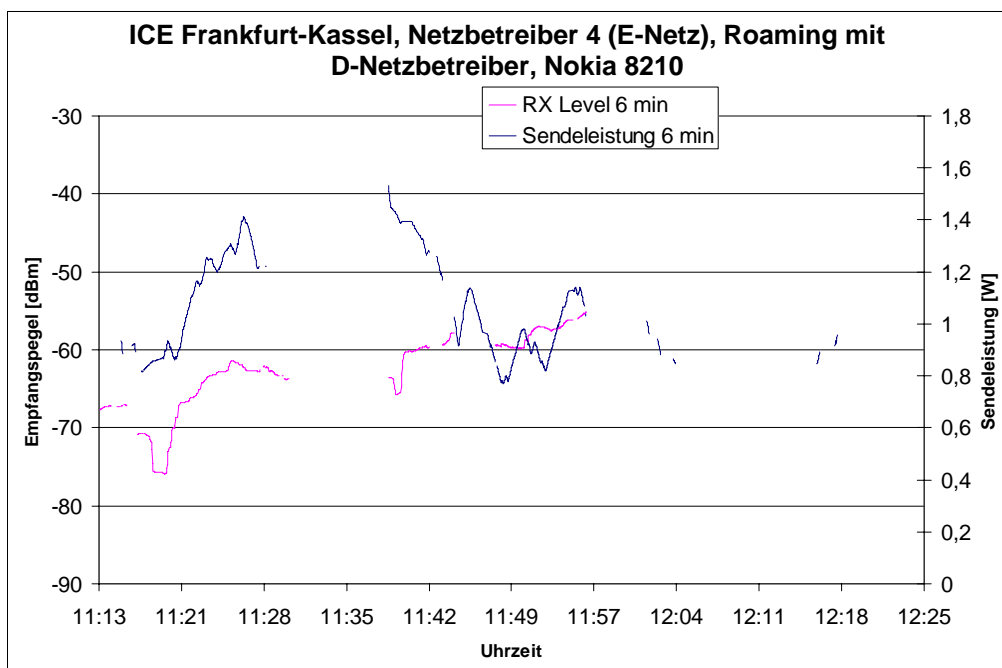


Abbildung 25: Diagramm aus Empfangspegel (RX-Level), gemittelt über 6 Minuten und maximaler Sendeleistung, ebenfalls gemittelt über 6 Minuten, als Funktion der Zeit für einen Netzbetreiber im E-Netz mit D-Netz-Roaming; ICE Frankfurt-Kassel

Abbildung 25 zeigt die Messdaten für die Strecke Frankfurt-Kassel. Es werden die Daten für einen Netzbetreiber im E-Netz dargestellt. In diesem Fall ist das Roaming mit einem D-Netzbetreiber fast durchgängig in Kraft.

Es ist zu erkennen, dass die Strecke Frankfurt-Kassel sehr schlecht versorgt ist und es immer wieder zu Abbrüchen kommt.

3. Etappe (Kassel - Göttingen)

Aufgrund der schlechten Versorgung der 3. Etappe, bei der es nur gelegentlich möglich war, ein Gespräch aufzubauen, das jedoch im Regelfall nur wenige Sekunden dauerte und somit nicht repräsentativ ist, werden diese Ergebnisse nicht im Detail vorgestellt, befinden sich aber in Tabelle 3. Es ist festzustellen, dass die Versorgung auf dieser Strecke nur auf einzelnen Abschnitten ausreichend für ein Telefonat ist.

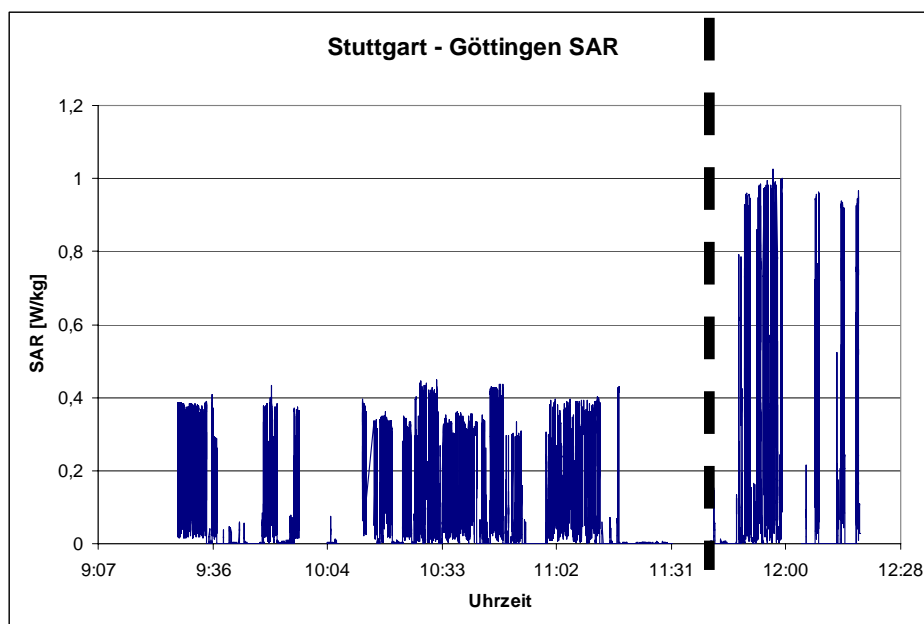


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der SAR-Werte gemessen am Maschek-Messkopf; Anbringung des Handys in gleicher Position bis 11:31 Uhr, ab 11:31 Uhr geänderte Fixierungsposition

Abbildung 26 zeigt die SAR-Werte aufgetragen über den Zeitraum der Messung für die Strecke Stuttgart bis Göttingen. Verwendet wurden die Mobiltelefone Nokia 6110 (bis Frankfurt, ca. 11 Uhr) bzw. 6150 (ab Frankfurt).

Es ist gut zu erkennen, dass ab 11:31 Uhr das Handy in einer anderen Position befestigt wurde und dies zu höheren gemessenen Maschek-SAR-Werten führte. In Relation zueinander sind die gemessenen SAR-Werte für die gleiche Befestigungsposition jedoch immer korrekt. Die absolute Höhe ist hingegen abhängig, wie nah die maximale Immissionsleistung an die Messsonde des Maschek-Messkopfes kommt.



Abbildung 27 zeigt den ab 11:31 Uhr geänderten Messaufbau.

Es wurde ein HP-Laptop ZD7015 verwendet, nachdem die Kapazität des Akkus des Siemens-Fujitus-Notebooks nachgelassen hatte.

Die ICE-Wagen, der auf dieser Strecke eingesetzten Baureihe, verfügen über keine Steckdosen, so dass die Laptops ausgetauscht wurden. Auf dem Widescreen Display des HP-Laptops lassen sich die vier einzelnen Monitorbilder gleichzeitig nebeneinander darstellen.

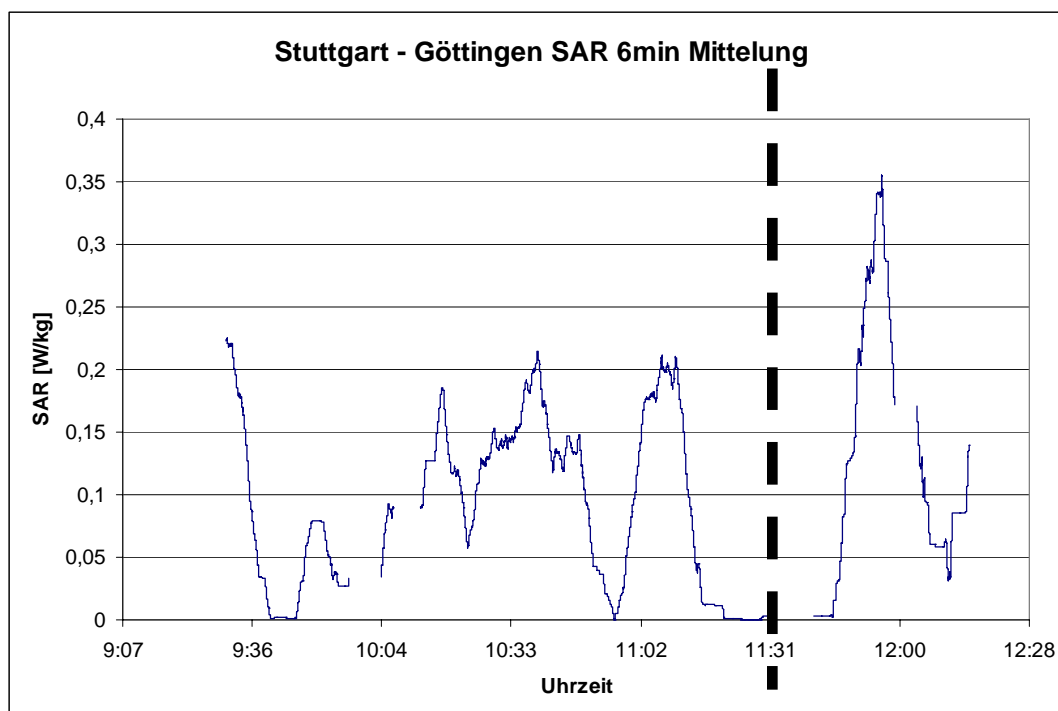


Abbildung 28: Zeitlicher Verlauf der SAR-Werte, gemittelt über 6 Minuten, gemessen am Maschek-Messkopf; Anbringung des Handys in gleicher Position bis 11:31 Uhr, ab 11:31 Uhr geänderte Fixierungsposition

Abbildung 28 zeigt die Mittlung der SAR-Werte über 6 Minuten. Es ist zu erkennen, dass die gemittelten SAR-Werte im Verlauf der Messfahrt sehr stark schwanken. Die Unterschiede im SAR-Wert vor und nach 11:31 Uhr sind bedingt durch eine andere Anbringung des Handys am Messkopf.

Die durchgeführten zeitlich 3 Stunden dauernden Messungen während der Zugfahrten stellen keine typischen Nutzungsprofile für eine Handynutzung im Zug dar. Bedingt durch die teilweise schlechte Feldversorgung bricht die Verbindung immer wieder ab, daher dauern die in den Zügen (auch in Repeaterwagen) geführten Gespräche nicht lange.

Die Mobilfunkverbindung in diesen schnell fahrenden Zügen ist dadurch geprägt, dass sehr viele Zellwechsel auftreten. Bei jedem Zellwechsel regelt das GSM-System das Handy wieder auf die maximale Sendeleistung von 2 Watt (GSM 900), zum anderen ist in der Regel ein niedriger Empfangspegel vorhängen, der ebenfalls ein Hochregeln der Sendeleistung bewirkt.

Durch die parallel verwendeten Mobiltelefone gibt es ggf. mehrere Werte für dieselbe Strecke und das gleiche Handy-Modell.

Da die SAR-Werte während der gesamten Zeit aufgezeichnet wurden - also auch während den Abschnitten, in denen kein Telefonat möglich war - resultiert dies in niedrigen Mittelwerten, da der gemessene SAR-Wert in den Zeitabschnitten ohne ein aktives Gespräch natürlich Null beträgt.

Durch die Miteinbeziehung der Abschnitte, in denen kein Telefonat möglich war, lässt sich eine anschauliche Aussage über die mögliche Strahlenbelastung einer Person beim Befahren der entsprechenden Strecke treffen.

Die nachfolgende Tabelle 3 auf der nächsten Seite zeigt die Übersicht der für die Zugfahrt statistisch ausgewerteten Messergebnisse.

	Fahrdauer [h:min]	Weglänge [km]	Mittelwert SAR [W/kg] (gefahrne Strecke)	Standard- abweichung des SAR- Wertes [W/kg] (gefahrne Strecke)	Mittelwert SAR [W/kg] (während eines Telefonats)	Standard- abweichung des SAR- Wertes [W/kg] (während eines Telefonats)	Mittelwert der maximalen Sendeleistung [W]	Standard- abweichung der Sendeleistung [W]	Mittlerer Empfangs- pegel [dBm]	Standard- abweichung des Empfangs- pegels [dBm]
Stuttgart Frankfurt Nokia 6110, Netzbetreiber 2 (D-Netz)	1:57 (Messbeginn vor Abfahrt in Stuttgart)	ca. 180 km	0,10	0,13	0,13	0,14	0,52	0,70	-48	-43
Stuttgart Frankfurt Nokia 6150, Netzbetreiber 4 (E-Netz, Roaming mit D-Netz)	1:57 (Messbeginn vor Abfahrt in Stuttgart)	ca. 180 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	1,0	0,66	-62	-55
Frankfurt – Kassel Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)	0:58	ca. 180 km	0,09	0,23	0,21	0,30	0,84	0,76	-51	-47
Frankfurt – Kassel Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz, Roaming mit D-Netz)	0:58	ca. 180 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	1,10	0,71	-60	-55
Frankfurt – Kassel Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)	0:58	ca. 180 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	0,89	0,76	-60	-55
Frankfurt – Kassel Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz, Roaming mit D-Netz)	0:58	ca. 180 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	1,06	0,86	-58	-52
Kassel – Göttingen Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)	0:32	ca. 41 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	0,72	0,66	-55	-50
Kassel – Göttingen Nokia 6150, Netzbetreiber 2 (D-Netz)	0:32	ca. 41 km	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	nicht gemessen	0,91	0,79	-66	-59
Kassel – Göttingen Nokia 8210, Netzbetreiber 4 (E-Netz, Roaming mit D-Netz)	0:32	ca. 41 km	nicht gemessen		nicht gemessen	nicht gemessen	1,00	0,36	-62	-52

Tabelle 3: Statistische Auswertung der Zugfahrt

5.2 Messungen beim Gang durch ein Gebäude

Telefonate beim Gang durch ein Gebäude (mit langsamen Zellwechseln und unterschiedlichen Feldstärken)

Für die Untersuchungen "Messungen beim Gang durch ein Gebäude" wurden anlässlich der CeBIT 2005 durch Versuchspersonen mehrere Telefonate in der Messehalle 13 am 15.03.2005 durchgeführt.

Die Netzversorgung und Netznutzung anlässlich der weltgrößten Computer- und Telekommunikationsmesse ist heutzutage für das restliche Land sicher noch keine Normsituation; jedoch zeigt die Versorgung und die Nutzung auf, wie die Netze weiterentwickelt werden können und wie die Strahlungsimmission für den Mobilfunknutzer in Zukunft aussehen könnte.

Die CeBIT Messehalle 13 ist sehr gut mit GSM-Netzen aller Netzbetreiber und mit UMTS versorgt. Es sind allein in der Halle 13 mehrere Basisstationen vorhanden, so dass Zellwechsel realisiert werden und der Regelalgorithmus für die Sendeleistung genutzt wird.

Bei diesen Messungen wurden die Sendeleistung und das Regelverhalten in zwei verschiedenen D-Netzen und in einem E-Netz und zusätzlich in einem UMTS-Netz untersucht.

Außerdem wurde der Messkopf der Firma Maschek GmbH mit einem montierten Telefon und einem Laptop in der Nähe der Versuchsperson durch die Messehalle geschoben. Die Mobiltelefone der Versuchspersonen waren mit einer Bluetooth-Verbindung an die Auswertesoftware im Laptop angeschlossen.

Alle einzelnen Messungen wurden einschließlich der relevanten einkopierten Daten zusätzlich auf Video festgehalten. Die Abbildungen 29 und 30 sind Einzelbilder dieser Videos.

Die beiden Versuchspersonen aus den Abbildungen 29 und 30 und Abbildung 57 wurden für diesen Zweck auf der Messe unter Vertrag genommen.

Versuchsperson 1: weiblich, 21 Jahre,

Versuchsperson 2: weiblich, 20 Jahre.

CeBIT: Telefonieren in Messehalle 13

Datum: 15.3.2005

Telefon	Mobilfunknetz	Monitorsoftware
Nokia 6150	D-Netzbetreiber 2 GSM 900/1800	Monitor (nobbi)
Nokia 6150	D-Netzbetreiber 1 GSM 900	Monitor (nobbi)
Nokia 8210	E-Netzbetreiber 4 GSM 1800	Monitor (nobbi)

Tabelle 4: Übersicht über die in der Halle 13 verwendeten Telefone, Mobilfunknetze und Software



Abbildung 29: Versuchsperson 1 (CeBIT) für Messungen in Halle 13



Abbildung 30: Versuchsperson 2 (CeBIT) für Messungen in Halle 13

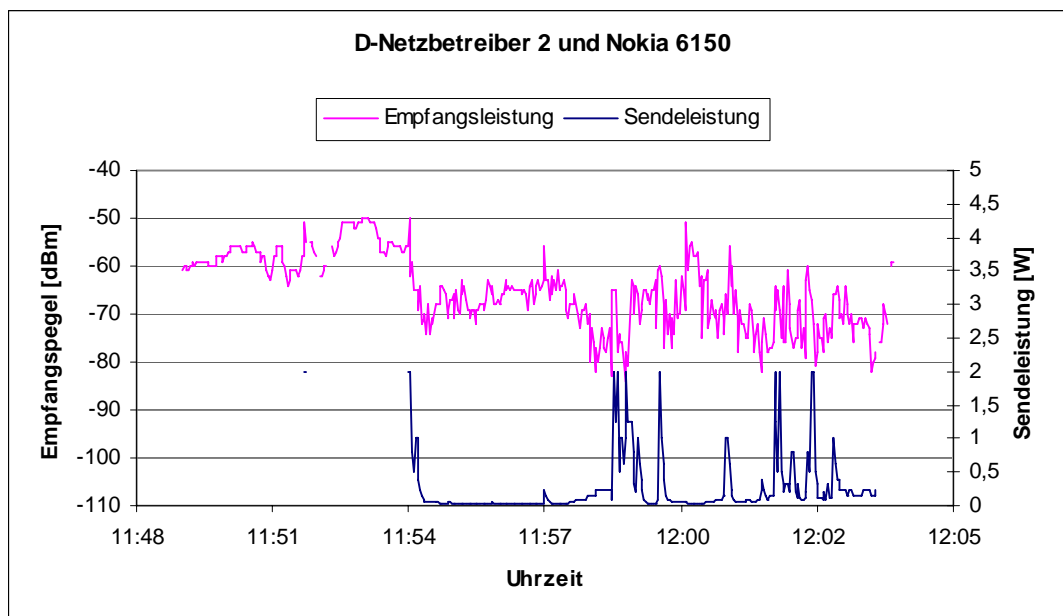


Abbildung 31: Diagramm aus Empfangsleistung und Sendeleistung, aufgetragen über die Zeit für einen D-Netz-Betreiber, gemessen in der Halle 13 (CeBIT)

Abbildung 31 zeigt ein sehr interessantes Regelverhalten im D-Netz. Ein D-Netz-Betreiber, der sowohl über GSM 900 als auch GSM 1800-Frequenzen verfügt, lenkt den Verkehr auf GSM 1800, obwohl hierfür der Empfangspegel geringer ist.

Vor dem Gesprächsaufbau befindet sich das Mobilteil in Bereitschaftszustand im GSM 900-Netz, nach Gesprächsaufbau findet ein durch das Netz aufgezwungener Handover nach GSM 1800 statt. Während ca. 1/5 der Zeit befand sich die Sprachverbindung in GSM 900 und in 4/5 der Zeit in GSM 1800. Man erkennt sehr gut, dass aufgrund der guten Versorgung die Leistungsregelung ein sehr starkes Herunterregeln der Sendeleistung bewirkt.

Vor dem Gesprächsaufbau (gegen 11:54 Uhr) wird vom Mobiltelefon die Empfangsleistung des Steuerkanals einer GSM 900 Zelle gemessen, der mit einer gleich bleibenden Leistung sendet. Nach dem Gesprächsaufbau erfolgt die Messung des zugewiesenen Verkehrskanals, dessen Leistung den übertragungstechnischen Gegebenheiten angepasst wird. Dies erklärt, wieso der Empfangspegel deutlich unter den Wert sinkt, den er vor dem Gespräch hatte. Die am Mobiltelefon empfangene Leistung ist ausreichend, um die Verbindung zu gewährleisten.

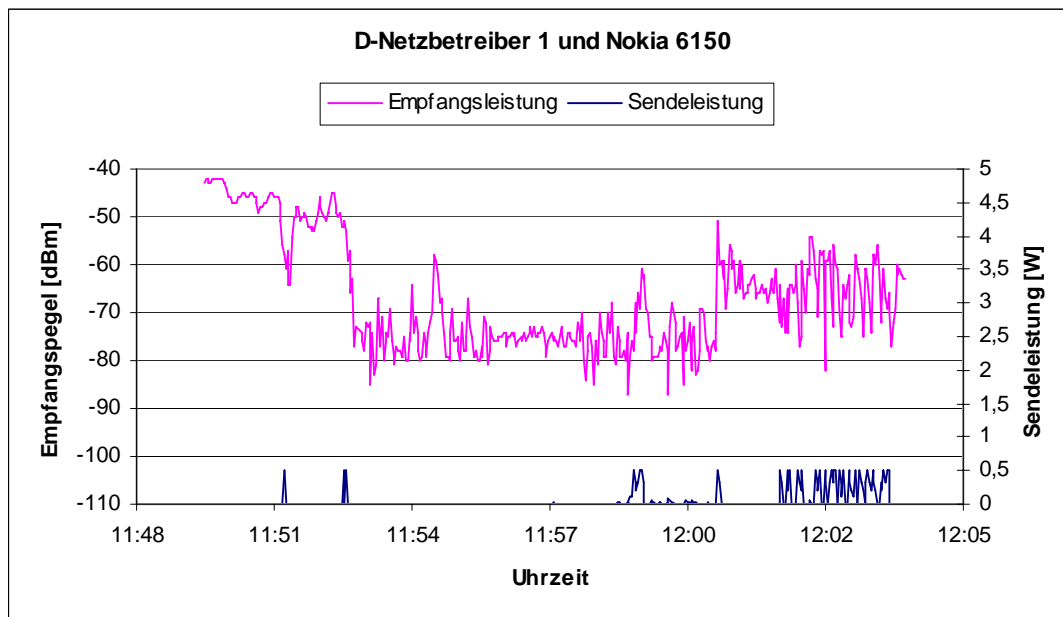


Abbildung 32: Diagramm aus Empfangs- und Sendeleistungspegel, aufgetragen über die Zeit

In dem Diagramm der Abbildung 32 erkennt man ein interessantes Netzregelungsverhalten, das dieser D-Netzbetreibers implementiert hat. Die Kommunikation verbleibt vollständig im 900 MHz-Bereich, jedoch sind die Basisstationen so programmiert, dass sie anscheinend dem Mobilteil eine maximale Sendeleistung von nur 0,5 Watt vorgeben.

Die Basisstation gibt vor, mit welcher Leistung ein Mobilteil maximal senden kann. Diesen Wert stellt der Netzbetreiber ein. Die eingestellte maximale Sendeleistungsbegrenzung gilt für alle in dieser Zelle eingebuchten Geräte, sei es für ein fest eingebautes Autotelefon (das mit z. B. 5 Watt senden könnte) oder für ein Mobilteil, das bis maximal 2 Watt senden kann. Der Parameter der Basisstation, der die maximale Sendeleistung für das Endgerät vorgibt, wurde im Datensatz nicht aufgezeichnet, so dass die Reduzierung der Maximalleistung zwar beobachtet wurde, aber nicht definitiv gesagt werden kann, dass eine Sendeleistungsbegrenzung durch die Basisstation vorlag.

Die mittlere Sendeleistung des bei diesem Netzbetreiber eingebuchte Handys ist sehr gering, da zum einen die Sendeleistungsregelung vollständig herunterregelt, zum anderen bei Zellwechsel oder ungünstigeren Empfangsbedingungen die maximale Sendeleistung bedingt durch die Vorgaben der Basisstation nur 0,5 Watt beträgt.

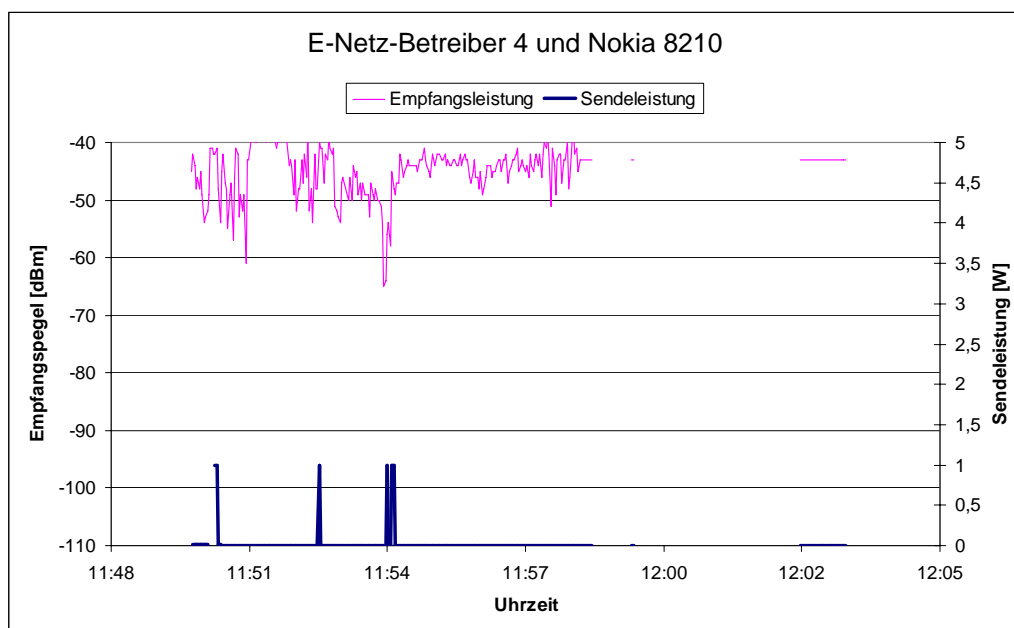


Abbildung 33: Diagramm aus Empfangs- und Sendeleistung als Funktion der Zeit im E-Netz in Messehalle 13

Abbildung 33 zeigt, dass in der Messehalle 13 eine sehr gute Feldversorgung dieses E-Netzbetreibers vorhanden war und der Netzbetreiber eine sehr schnelle Leistungsregelung implementiert hatte. Es erfolgte eine 'one shot power control' Regelung, d.h. von PCL 0 direkt auf PCL 10 (zu Leistungsregelungsstufen siehe Seite 129).

In 90 % der Kommunikationszeit erfolgte die Kommunikation mit der PCL Stufe 15, d. h. der niedrigsten Stufe in GSM 1800, dies entspricht einem Wert von 1 mW = 0,001 Watt.

Die verwendeten Nokia 8210 Telefone ermöglichten kein durchgängiges Auslesen der Monitoraten, so dass nur für einen Teil der Messzeit Daten vorlagen.

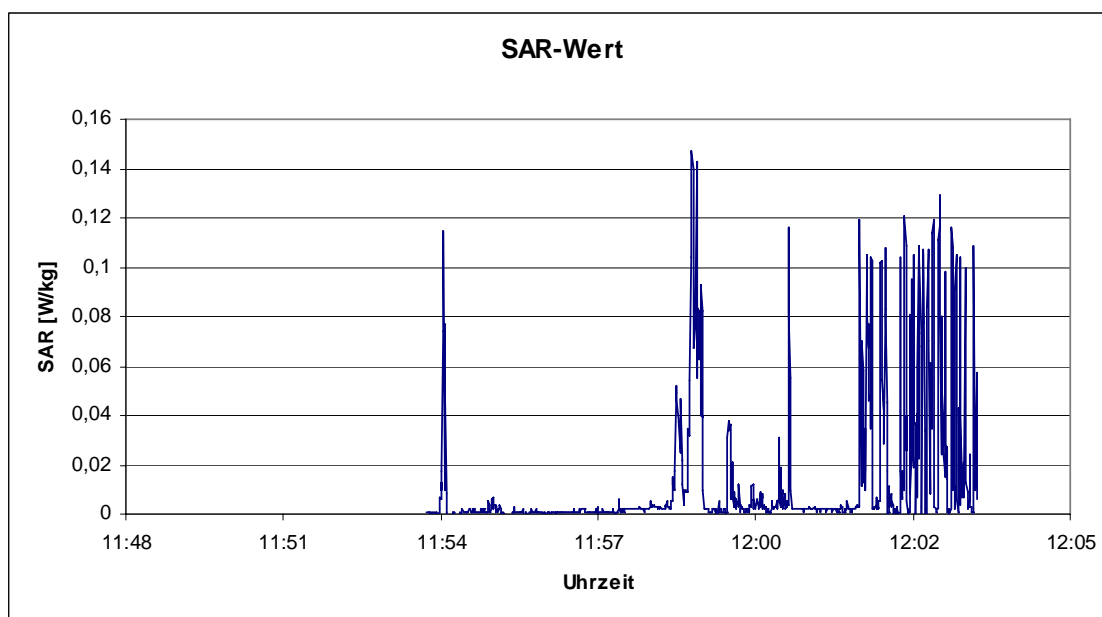


Abbildung 34: SAR-Wert gemessen am Messkopf, aufgetragen über die Zeit

Abbildung 34 zeigt den SAR-Wert eines am Messkopf befestigten Nokia 6150 Handys, das bei dem Netzbetreiber 1 im D-Netz eingebucht ist. Es werden Momentanwerte dargestellt.

Die Abbildung 34 ist in Zusammenhang mit Abbildung 32 zu sehen. Die Korrelation zwischen SAR-Wert und der Sendeleistung eines anderen an anderer Stelle befindlichen Handys, beide eingebucht im gleichen Netz lässt sich sehr gut erkennen. Kennzeichnend für Abbildung 34 ist ein niedriger SAR-Wert, der auch in den Maximalphasen mit 0,14 W/kg weit unter den zulässigen Werten bleibt. Der niedrige gemessene SAR-Wert ist bedingt durch die aufgrund des hohen Empfangspegels nur geringe erforderliche Sendeleistung und die bei einem Zellwechsel oder Hochregeln begrenzte Leistung auf 0,5 Watt (1/4 der maximal möglichen Leistung).

Der Mittelwert des gemessenen SAR-Werts beträgt 0,0135 W/kg, die Standardabweichung 0,0283 W/kg.

Beim Vergleich dieser Werte mit den Berechnungen aus Tabelle 5, ist zum einen zu beachten, dass das Telefonat bereits um 11:51 Uhr begann, für den Zeitraum vor 11:54 Uhr jedoch keine SAR Werte aufgezeichnet wurden. Zum anderen ist nicht auszuschließen, dass zusätzlich zum angebrachten Mobiltelefon auch die Strahlungsleistung anderer Handys vom Messkopf berücksichtigt wurde.

Die in der nachfolgenden Tabelle 5 angegebenen SAR-Werte wurden aus der gemessenen Sendeleistung **berechnet** und berücksichtigen den DTX Modus **nicht**, d.h. es wird davon ausgegangen, dass das Mobiltelefon alle zur Verfügung stehenden Zeitschlitzte ausnutzt.

	Dauer [min]	Mittelwert SAR [W/kg]	Standardabweichung des SAR-Wertes [W/kg]	Mittelwert der maximalen Sendeleistung [W]	Standardabweichung der Sendeleistung [W]	Mittlerer Empfangspegel [dBm]	Standardabweichung des Empfangspegels [dBm]
Mit Person 1, E-Netzbetreiber 4, Nokia 6650	27	0,12	0,21	0,23	0,38	-49	-44
Mit Person 2, D-Netzbetreiber 2, Nokia 6650	19	0,13	0,17	0,27	0,43	-61	-57
Auf Wagen, D-Netzbetreiber 1, Nokia 6150	15	0,03	0,05	0,07	0,15	-64	-60
Auf Wagen, D-Netzbetreiber 2, Nokia 6150	15	0,12	0,18	0,27	0,45	-64	-60
Auf Wagen, E-Netzbetreiber 4, Nokia 8210	15	0,001	0,007	0,02	0,14	-43	-44

Tabelle 5: Übersicht der Ergebnisse beim 'Gang durch ein Gebäude (Halle 13 der CeBIT)'

5.3 Messungen bei Telefonaten in einem Raum

Nachdem im ersten Teil der Messungen Messfahrten im Fahrzeug und in der Eisenbahn durchgeführt wurden und damit Messungen mit vielen Zellwechseln und im zweiten Teil beim Gang durch ein Gebäude ein Szenario mit wenigen Zellwechseln untersucht wurde, wurden bei den dritten Messreihen die Sendeleistungsregelung bei einem "stationären Telefonat in einem Raum" ermittelt.

Ein Zellwechsel war bei allen unseren Untersuchungen zum "Telefonieren in einem Raum" ausgeschlossen.

Die Nutzung des Handys in einem Raum ist der Regelfall.

Die Nutzung der Handys in geschlossenen Räumen, und dies auch über einen längeren Zeitraum, wird zukünftig aufgrund der Tarifpolitik der Netzbetreiber immer häufiger sein. Die Netzbetreiber bieten heutzutage so genannte Pauschalpakete an, bei denen man z. B. für 5 € im Monat an den Wochenenden 1000 Minuten telefonieren kann, d. h. pro Nutzungstag knapp 2 Stunden.

Damit wird das einzelne Gespräch in der Regel beträchtlich länger als 6 Minuten dauern, und es ist daher für dieses Projekt interessant festzustellen, wie sich die Regelung des Sendeleistungsverhaltens im Laufe eines längeren Gespräches einpendelt.

Für diese 30 Minuten-Gesprächs-Messungen hatten wir bei den Messungen 'Telefonate in einem Raum' acht unterschiedliche freiwillige Versuchspersonen rekrutiert, die bereit waren, reale – mindestens halbstündige – Gespräche zu führen und sich dabei auf Video aufnehmen ließen. Es handelte sich hierbei um einen 8-jährigen Jungen, eine 17-jährige Jugendliche und einen 17-jährigen Jugendlichen, einen 32-jährigen Mann und eine 44-jährige Frau und zusätzlich um einen 24-jährigen, einen 26-jährigen und einen 30-jährigen Studenten.

Die Videoaufzeichnungen wurden ohne Ton gemacht, so dass die Versuchspersonen zwanglos telefonieren konnten. Der Versuchsperson wurden keine Vorgaben hinsichtlich Haltung oder Bewegungen vorgegeben. Die Videoaufzeichnungen zeigten, dass sich die Versuchspersonen ganz unterschiedlich bewegten und die Telefonhaltung von rechts nach links und umgekehrt variierte. Die Videokamera wurde nach kurzer Zeit von den Versuchspersonen nicht mehr wahrgenommen, und es handelte sich dann um ein ganz normales zwangloses Telefonat.

5.3.1 Telefonat in einem Raum (ohne Zellwechsel), GSM 1800-Netz

Abbildung 35 zeigt die Regelung der Sendeleistung. Am Anfang zum Zeitpunkt 0:00 wird das Gespräch aufgebaut, da es sich um ein GSM 1800 MHz-Netz handelt, ist die maximale Sendeleistung beim Aufbau 1 Watt.

Erstaunlich ist, dass im Verlauf des 30-minütigen Telefonats immer wieder Regelwerte von 1 Watt erreicht wurden. Durch das häufige Hochregeln auf den Maximalwert ergibt sich trotz des zeitweiligen Herunterregels bis auf 0,05 Watt dennoch ein über 10 Minuten gemittelter Wert von bis zu 0,5 Watt.

Der tatsächliche mittlere Sendeleistungswert beträgt 0,5 Watt geteilt durch 8 (aufgrund der Verschachtelung von 8 Gesprächskanälen in einem Funkkanal) = 0,0625 Watt und unter Berücksichtigung des DTX-Modus in der Hälfte der Telefonierzeit: $0,0625 \text{ W} \times 0,6 = 0,04 \text{ Watt}$.

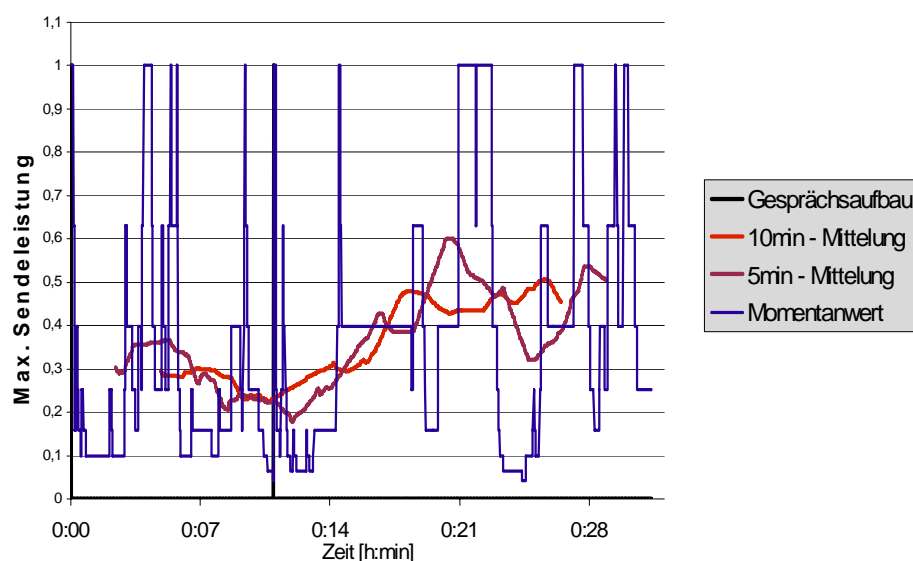


Abbildung 35: Regelung der Sendeleistung (Telefonat im Raum ohne Zellwechsel)

Abbildung 36 zeigt eine der Versuchspersonen.

In das aufgezeichnete Video wurden:

- der Empfangspegel (RX Level),
- die Bitfehlerrate in Prozent
- und zusätzlich am unteren Bildrand die Sendeleistung (TX Power, vorgegeben durch die Basisstation) einkopiert.

Diese Messdaten sind zeitsynchron mit dem Videobild, so dass man direkt den unterschiedlichen Haltungen im Videobild die verschiedenen Werte zuordnen kann.

Es treten Änderungen der Sendeleistung auf begründet durch:

- z. B. Handwechsel (Bildfolge: Abbildung 36)
- Sprünge in der Bitfehlerrate (Bildfolge: Abbildung 37) und
- es wurde die Sendeleistung hochgeregelt, ohne dass sich an der Bitfehlerrate oder an der Position des Telefonierenden etwas ändert (Bildfolge: Abbildung 38).

Untersuchungen in anderen Projekten haben gezeigt, dass Änderungen im lokalen Umfeld der Basisstation (Bäume bewegen sich im Wind, Lastwagen fährt vorbei) sehr stark das Regelverhalten des Handys beeinflussen, da die Empfangsqualität des Sprachkanals an der Basisstation unterschiedlich ist.

Dies sind die Fälle, in denen man bei der Beobachtung des Telefonierenden und der Empfangspegel keine erkennbaren Hinweise auf ein erforderliches Regelverhalten der Sendeleistung erhält.



Abbildung 36: Änderung der Sendeleistung (TX Power) bei Handwechsel



Abbildung 37: Änderung der Sendeleistung (TX Power) bei sprunghafter Änderung der Bitfehlerrate



Abbildung 38: Regelung des Sendeleistungspegels (TX Power) ohne direkt erkennbaren Grund

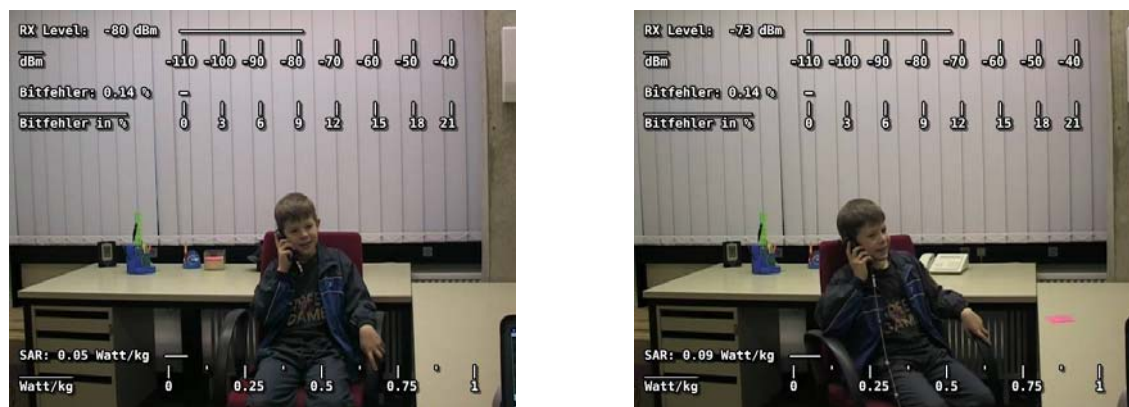


Abbildung 39: Versuchsperson 'kleiner Junge' in verschiedenen Haltungen mit eingblendeten berechneten SAR-Werten

Abbildung 39 zeigt die Versuchsperson "kleiner Junge" mit verschiedenen Handhaltungen des Nokia Telefons 6150 im E-Netz. Eingebildet ist oben der Empfangspegelwert, weiter unten der Bitfehler, ganz unten ist der SAR-Wert eingebildet, der aus dem Sendeleistungspegel entsprechend Kapitel 9 errechnet wurde.

Abbildung 40 zeigt fünf Versuchspersonen. Der über den Zeitraum von einer halben Stunde gemittelte (maximale) Sendeleistungspegel ist in das jeweilige Bild einkopiert.

Da es sich um den Sendeleistungspegel, der von der Basisstation dem Handy vorgegeben wird, handelt, spielt der DTX-Modus keine Rolle. Unter der Annahme, dass permanent gesprochen wurde (d.h. der DTX-Modus inaktiv ist) ergäbe sich die mittlere Sendeleistung aus der Division der gemittelten Sendeleistung durch acht.

Charakteristisch für alle fünf Versuchspersonen war ein halbstündiges Gespräch in einem Raum, der mittelgut mit einem GSM 1800-Netz versorgt war.

Das Handy (Nokia 6150) und die übrige technische Ausrüstung waren für alle Versuchspersonen gleich.

Erstaunlich sind die beträchtlichen Abweichungen des gemittelten Spitzenwertes je nach Versuchsperson.



Abbildung 40: Fünf Versuchspersonen mit dem jeweils über eine halbe Stunde gemittelten Sendeleistungspegel; alle in Raum 2

Abbildung 41 zeigt jeweils zwei Versuchspersonen mit den gemittelten Spitzenwerten des Sendeleistungspegels an unterschiedlichen Tagen in unterschiedlichen Räumen:

- Raum 1: Gute Feldversorgung (hoher Empfangspegel) führt zu einem geringen gemittelten Spitzensendeleistungspegel.
- Raum 2: Mittlere bis schlechte Feldversorgung (schwacher Empfangspegel) führt zu einem höheren gemittelten Spitzensendeleistungspegel.



Abbildung 41: Versuchspersonen mit jeweils gemitteltem Sendeleistungspegel an unterschiedlichen Tagen in unterschiedlichen Räumen

In Abbildung 42 ist die Auftrittshäufigkeit der verschiedenen Sendeleistungswerte aufgetragen in Abhängigkeit von:

- einer guten Versorgung (in Abbildung 41 steht hierfür die Feldversorgung im Raum 1) und
- einer mittleren Versorgung (in den Abbildungen 40 und 41 steht hierfür die Feldversorgung im Raum 2).

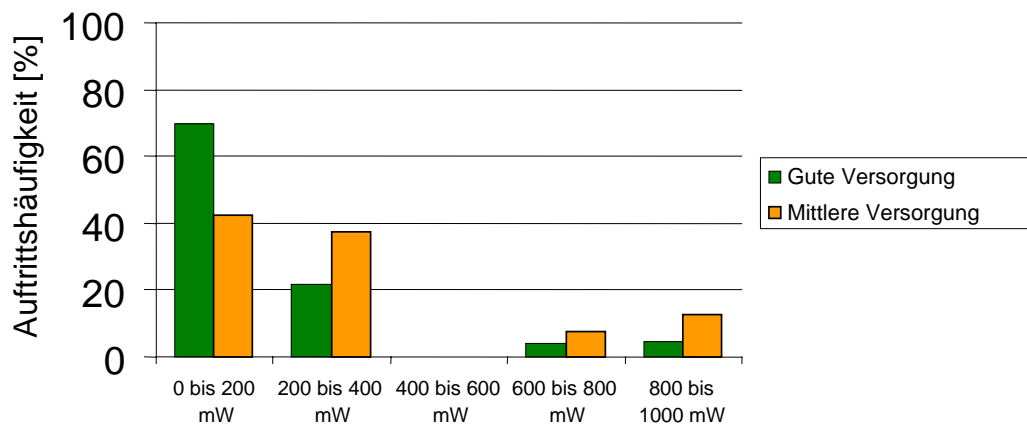


Abbildung 42: Auftrittshäufigkeit der verschiedenen Sendeleistungswerte als Funktion der Netzversorgung

5.3.2 Telefonate in einem Raum (ohne Zellwechsel), GSM 900-Netz

Telefon: Nokia 6150

Netz: D-Netzbetreiber 2 im GSM 900, Zelle: BCCH 116 (Heizkraftwerk ~ 600m entfernt)

Ort: Pfaffenwaldring 47, Raum 3.252

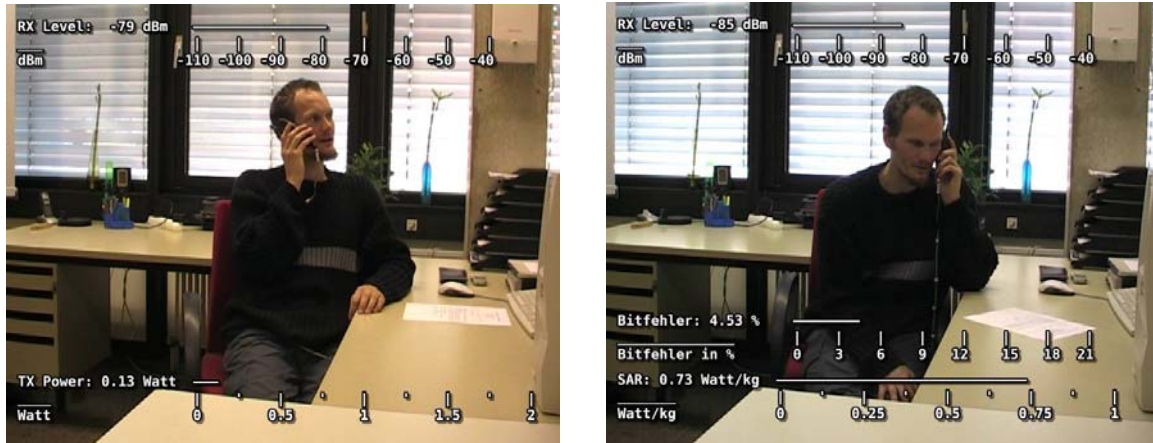


Abbildung 43: Versuchsperson (Student 1) in unterschiedlichen Haltungen, links eingeblendet RX-Level und Sendeleistung (TX Power) und rechts Empfangspegel, Bitfehlerrate und der errechnete SAR-Wert

Student 1

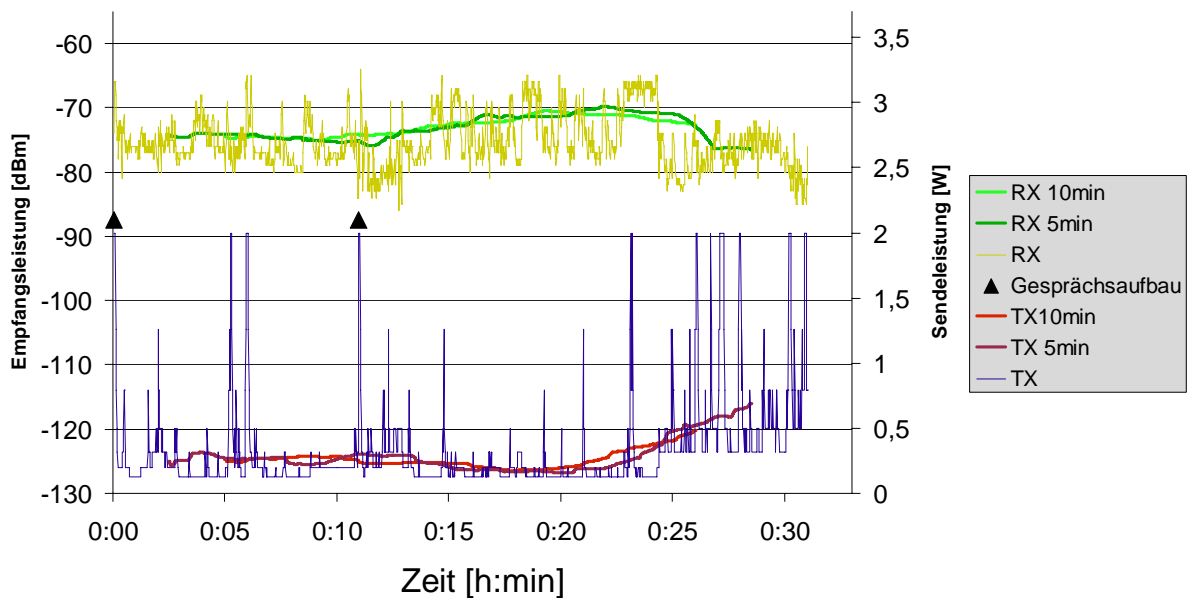


Abbildung 44: Diagramm aus Empfangsleistung und maximaler Sendeleistung, aufgetragen über die Zeit, zusätzlich eingetragen die jeweils über 5 und 10 Minuten gemittelten Werte

Abbildung 44 zeigt sehr gut den hohen Empfangspegel im Raum und zusätzlich ist gut die Regelung der Sendeleistung zu erkennen. Ab der 24. Minute scheint durch die andere Haltung des Telefons ein "Abschirmverhalten" zwischen Telefon und Basisstation zu erfolgen, was zu einem Hochregeln der Sendeleistung führt, damit steigt auch die gemittelte Sendeleistung etwas an.



Abbildung 45: Versuchsperson (Student 2) zu verschiedenen Zeitpunkten der Messungen; eingeblendet der jeweilige berechnete SAR-Wert

Student 2

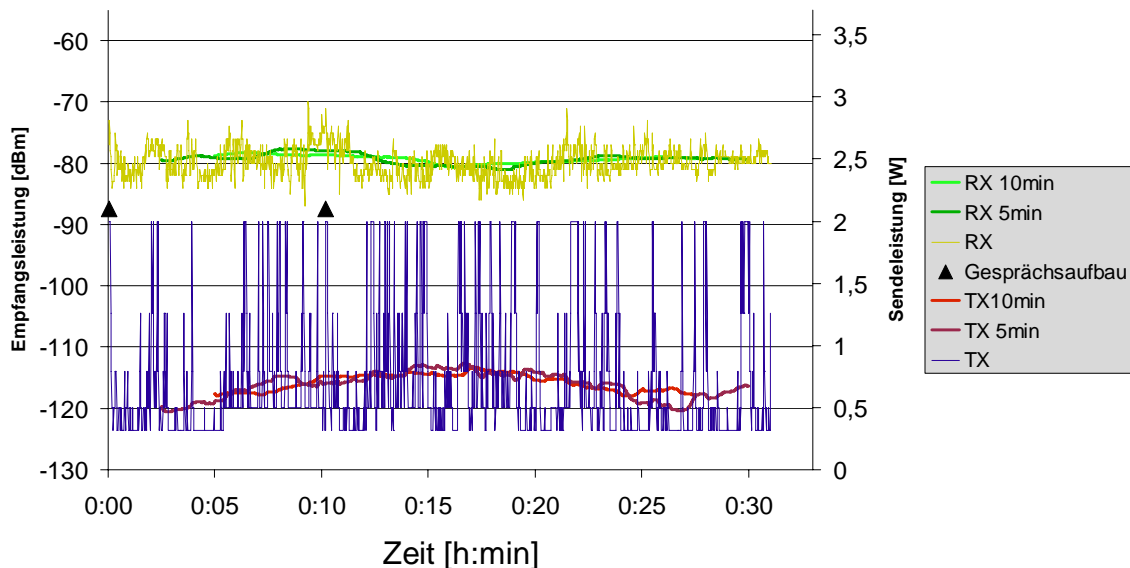


Abbildung 46: Diagramm aus Empfangs- und maximaler Sendeleistung, aufgetragen über die Zeit und gemittelt über 5 bzw. 10 Minuten

Abbildung 46 zeigt, dass trotz des im Video dokumentierten sehr ruhigen Telefonier-Verhaltens der 'Versuchsperson Student 2' ein Hochregeln der Sendeleistung erfolgte, obwohl das Handy in Richtung der Basisstation gehalten wurde und die Versuchsperson keinen Handwechsel und nur geringe Bewegungen durchführte.

In der Videodokumentation kann nur die Handyhaltung dokumentiert werden, die Übertragungsstrecke ist jedoch geprägt sowohl durch die Handyhaltung als auch durch die Entfernung und die Reflexionen und durch die zeitabhängige Dämpfung auf der Übertragungsstrecke. Daher kann es trotz einer nahezu stationären Positionierung des Handys, wie hier durch die Versuchsperson Student 2, dennoch zu häufigen Leistungsregelungen einschließlich des Erreichens der maximalen Sendeleistungsstufe kommen.



Abbildung 47: Versuchsperson (Student 3)

Student 3

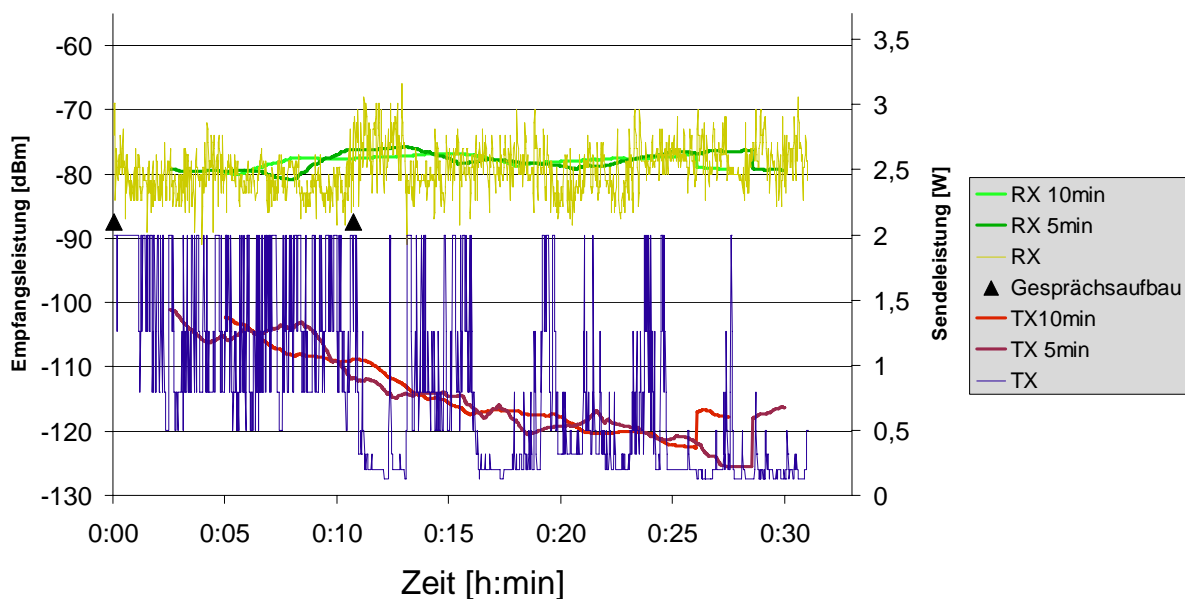


Abbildung 48: Diagramm aus Empfangs- und maximaler Sendeleistung, aufgetragen über die Zeit für die Versuchsperson Student 3

Aus Abbildung 48 ist zu erkennen, dass während des ersten Gespräches (in den ersten 10 Minuten) es zu einem häufigen Hochregeln der Sendeleistung gekommen ist. Diese Erfordernis des Hochregelns ist aus dem Empfangspegel nicht zu folgern. Im zweiten Telefonat (20 Minuten) kommt es zu sehr viel weniger Hochregelungsvorgängen, und die mittlere Sendeleistung ist dadurch geringer. Die Position des Handys blieb immer am Kopf gleich, d. h. der Kopf war zwischen Basisstation und Telefon.

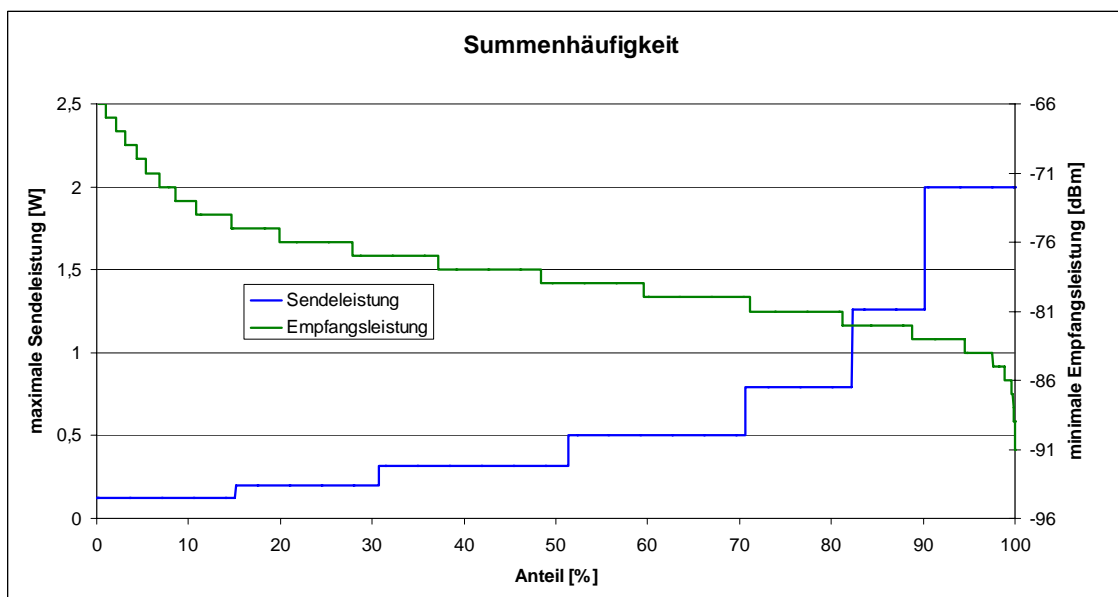


Abbildung 49: Summenhäufigkeit der maximalen Sendeleistung und der minimalen Empfangsleistung für GSM 900

Aus Abbildung 49 und den Messreihen, dargestellt ab Abbildung 43, ist zu erkennen, dass der Raum in dem die Telefonate geführt wurden durchschnittlich bis gut versorgt ist.

Dem Diagramm kann entnommen werden, dass vom Mobiltelefon in etwa 10 % der Zeit die maximale Sendeleistung von 2 W verwendet wurde. Die Zeit des Gesprächsaufbaus, während der die maximale Sendeleistung verwendet wurde, trägt dabei einen geringen Anteil*.

Ebenso ist in 10% der Zeit die Empfangsleistung kleiner als -83 dBm.

Würde die Leistungsregelung des Telefons ausschließlich von der Stärke des Empfangspegels abhängen, müsste zu folgern sein, dass die Sendeleistung von 2 W nur dann verwendet wird, wenn der Empfangspegel niedriger als -83 dBm ist.

Den Diagrammen über die zeitlichen Verläufe beider Größen ist jedoch zu entnehmen, dass diese Aussage nicht zutrifft.

Beispielsweise ist bei Student 1 zum Zeitpunkt 0:23 eine kurze Erhöhung der Sendeleistung auf 2 Watt festzustellen, obwohl der Empfangspegel über -70 dBm liegt.

In diesem Fall könnte vermutet werden, dass die Ausbreitungsbedingungen schlecht sind, weshalb die Basisstation zur Kompensation bereits die Leistung erhöht hat, was dazu führt, dass ein relativ hoher Empfangspegel vorliegt. Da über die verwendete Leistung an der Basisstation nichts bekannt ist, kann darüber jedoch nur spekuliert werden.

* Abschätzung: 5 Sekunden auf höchster Leistung bei Gesprächsaufbau

Insgesamt: Telefonate über ca. 90 Minuten, 6 Gesprächsaufbauten mit $6 \times 5 \text{ s} = 0,5 \text{ Minuten}$ mit höchster Leistung, entspricht 0,55%.

Die statistischen Werte der Gespräche, die alle mit Nokia-Handy des Typs 6150 durchgeführt wurden, sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die angegebenen SAR Werte wurden **berechnet** und berücksichtigen den DTX-Modus **nicht**. Letzteres führt zu einer Überschätzung der SAR Werte im Vergleich zum tatsächlichen Fall (vgl. 5.1.1), da Gesprächspausen Bestandteile der Telefonate waren.

	Dauer [min]	Mittelwert SAR [W/kg]	Standard- abweichung des SAR- Wertes [W/kg]	Mittelwert der maximalen Sendeleistung [W]	Standard- abweichung der Sende- leistung [W]	Mittlerer Empfangs- pegel [dBm]	Standard- abweichung des Empfangs- pegels [dBm]
Frau Raum 1 E-Netz	30	0,08	0,10	0,14	0,18	-63	-60
Mann Raum 1 E-Netz	30	0,12	0,14	0,23	0,26	-75	-70
Frau Raum 2 E-Netz	30	0,20	0,15	0,36	0,28	-75	-70
Mann Raum 2 E-Netz	30	0,30	0,20	0,56	0,37	-72	-72
Jugendliche Raum 2 E-Netz	30	0,14	0,10	0,25	0,19	-73	-73
Jugendlicher Raum 2 E-Netz	30	0,16	0,12	0,30	0,23	-79	-79
Kind Raum 2 E-Netz	30	0,14	0,12	0,26	0,22	-71	-69
Student 1 D-Netz	30	0,12	0,13	0,32	0,36	-75	4
Student 2 D-Netz	30	0,25	0,18	0,67	0,49	-80	2
Student 3 D-Netz	30	0,29	0,24	0,80	0,66	-79	3

Tabelle 6: Ergebnisübersicht der 'Telefonate in einem Raum' ohne Zellwechsel

5.4 Messungen beim Zufußgehen im Freien

Für das Sprachtelefonat in freiem Gelände wurde eine Strecke in der Nähe des Campus Vaihingen der Universität Stuttgart gewählt.

Die etwa 4,5 km lange Strecke zeichnet sich durch ihr hügliges Profil aus. Dies erschwert die Mobilfunkversorgung und führt in Folge der hohen Pfaddämpfungen zu den weit entfernten Basisstationen, zu denen nicht immer eine Sichtverbindung besteht, zu einer relativ hohen Sendeleistung des Mobilfunkgeräts.

Datum: 22.4.2005, Zeit: 11:30 – 12:30 Uhr

Telefon: Nokia 6150, D-Netzbetreiber 2 im GSM 900-Netz

Ort: Pfaffenwald, Stuttgart-Vaihingen, Route: siehe Karte, ca. 4,5 km

Gelände: Unbebaut, größtenteils bewaldet, hügelig

Proband: 26 Jahre, männlich

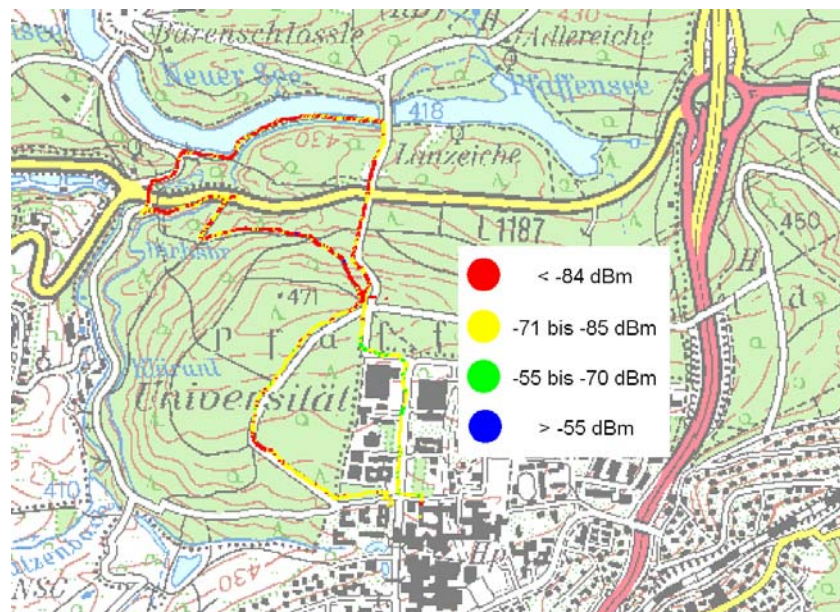


Abbildung 50: Der dem Fußweg zugeordnete Empfangspegel

Abbildung 50 zeigt, dass das Gebiet zwar ausreichend, aber mit relativ schwacher Feldstärke versorgt ist. Die durch die Umgebung bewirkte Dämpfung der Empfangsleistung führt dazu, dass die Sendeleistung erhöht wird.

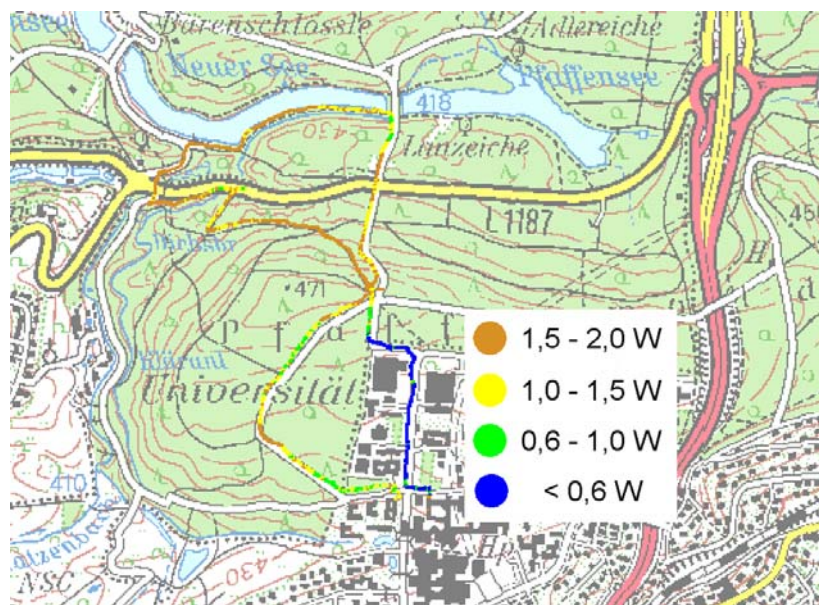


Abbildung 51: Die dem Fußweg zugeordnete maximale Sendeleistung

Abbildung 51 zeigt die entlang des Fußweges verwendete Sendeleistung des Mobilfunkhandys. Es ist zu erkennen, dass außerhalb des Universitätscampus eine deutlich höhere Sendeleistung verwendet wird. Die Ursache hierfür ist die nicht so gute Netzversorgung, da keine Basisstation in unmittelbarer Nähe ist bzw. die Sektoren der nächstgelegenen Basisstationen nicht auf das Gebiet ausgerichtet sind. Die Topographie des Geländes erschwert zusätzlich die Versorgung. Dennoch ist Telefonieren mit üblicher Qualität und ohne Gesprächsabbruch möglich, d. h. das Gebiet gilt als versorgt.

Die eingetragene Sendeleistung ist die maximale Sendeleistung, d. h. der Wert müsste zur Bestimmung der mittleren Sendeleistung noch durch 8 geteilt werden. Unter Berücksichtigung eines eventuellen DTX-Modus wäre die gemittelte mittlere Sendeleistung noch weiter zu reduzieren.

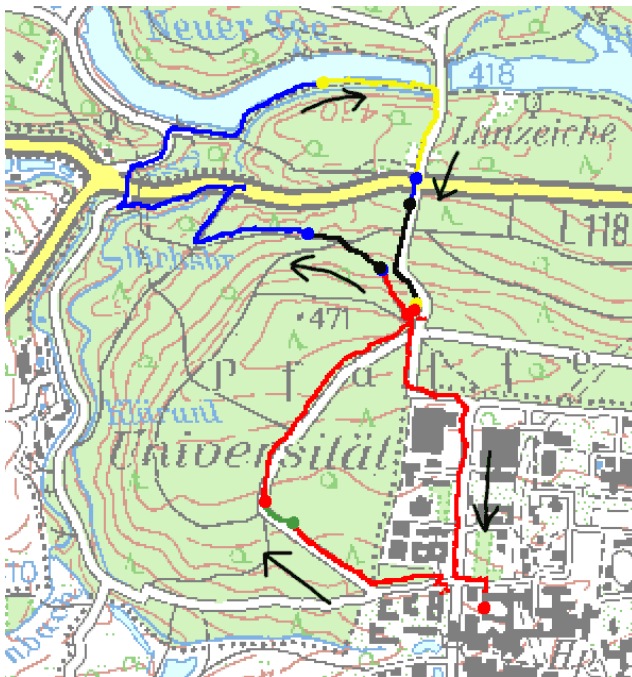


Abbildung 52:
Jeweils aktive Zelle, über die das Mobilfunkgespräch abgewickelt wird

Abbildung 52 zeigt, wobei die Laufrichtung mit Pfeilen angegeben ist, dass:

- insgesamt fünf verschiedene Zellen während des Telefonats (jeweils farblich gekennzeichnet), verwendet wurden
- 10 Handover stattfanden (jeweils mit dickem Punkt markiert)
- die Zellgrenzen gut zu erkennen sind
- dass trotz der schwierigen Topographie kein Ping Pong Handover auftrat.

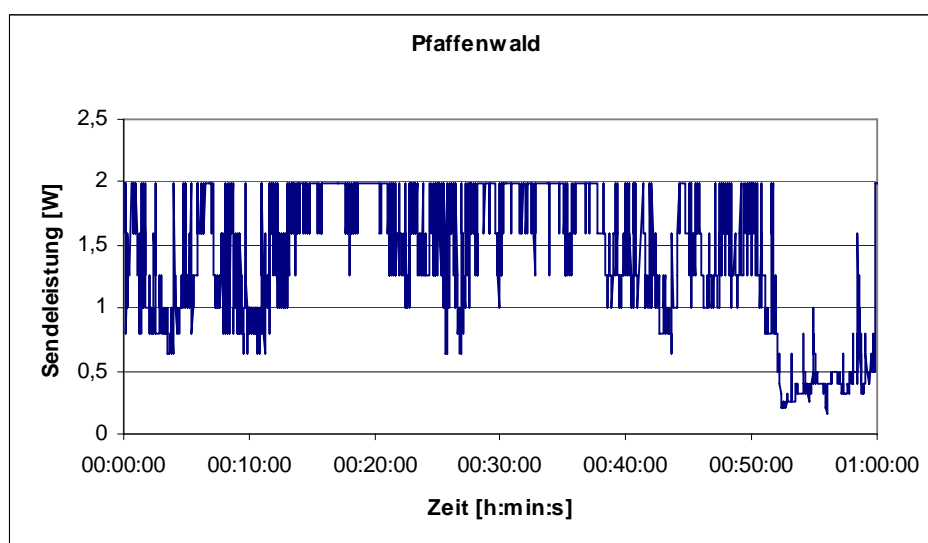


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Sendeleistung

Abbildung 53 zeigt, dass außerhalb des Campus bzw. hinter der Erhebung deutlich höhere Sendeleistungswerte auftraten; dies ist auch in Abbildung 51 zu erkennen.

Statistischer Werte der Sendeleistung

- Mittelwert: 1,39 Watt
- Standardabweichung: 0,56 Watt

Statistische Werte des SAR-Wertes (skaliert mit 0,366 W/kg / 1 W (GSM))

- Mittelwert: 0,51 W/kg
- Standardabweichung: 0,20 W/kg

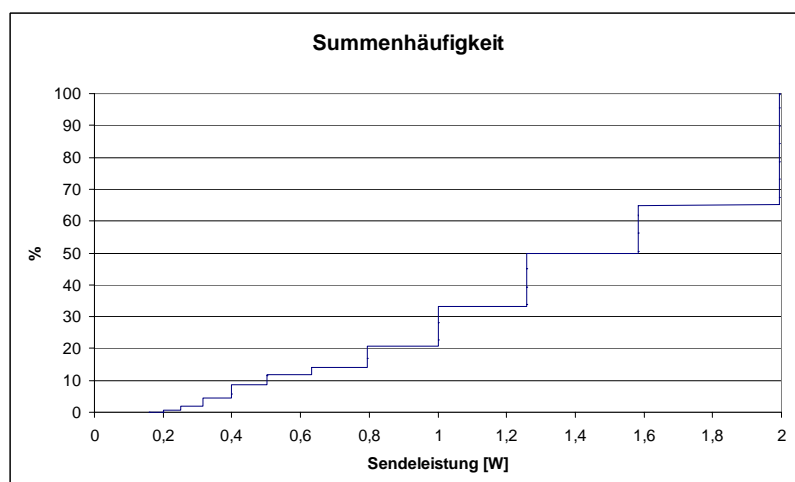


Abbildung 54:
Summenhäufigkeit der
Sendeleistung

Aus Abbildung 54 ist zu erkennen, dass

- die Sendeleistung von < 1 W nur in 20 % der Fälle auftritt
- die Sendeleistung < 2 W in etwa $2/3$ aller Fälle und die maximale Sendeleistung von 2 Watt während $1/3$ des gesamten Weges verwendet werden

6. Messungen bei UMTS

Das Mobilfunknetz der 3. Generation, das Anfang des Jahres 2004 in Deutschland in Betrieb genommen wurde, unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht vom GSM-Netz.

Das zugewiesene Frequenzspektrum liegt im Bereich von 1920 bis 1980 MHz für den Uplink (vom Mobiltelefon zur Basisstation) und 2110 bis 2170 MHz im Downlink. Im Gegensatz zu GSM, in dem die einzelnen Teilnehmer durch unterschiedliche Frequenzen und unterschiedliche Zeitschlitze getrennt sind, verwenden alle Teilnehmer eines UMTS-Mobilfunknetzes zeitgleich die gleiche Frequenzbandbreite. Die Zuordnung der Aussendungen erfolgt aufgrund einer unterschiedlicher Codierung, auch CDMA (Code-Division-Multiple-Access) genannt. Die Bandbreite ist mit 5 MHz deutlich größer als bei GSM, weshalb es möglich ist, höhere Bitraten zu übertragen, womit Multimediaanwendungen, wie Videoübertragungen, möglich werden. Da für ein Sprachtelefonat aufgrund der fortschrittlichen Kodierungsverfahren relativ kleine Datenströme anfallen, wird die Sprachinformation gespreizt, d.h. auf mehrere Chips (kleinste digitale Informationseinheit bei UMTS) aufgeteilt, die alle die gleiche Information tragen. Da sich durch die Aufteilung der gleichen Information auf mehrere Chips die Energie pro Information erhöht, ist eine relativ geringe Sendeleistung ausreichend. Je größer der Spreizfaktor gewählt wird, desto kleiner ist die benötigte Sendeleistung. Gleichzeitig sinkt jedoch auch die zu übertragende Bitrate, da die Anzahl der übertragenen Chips konstant ist.

Regelverhalten bei UMTS

- Dynamischer als bei GSM: 1500 Änderungen pro Sekunde
- Kleinere Stufen: in 1 dB Schritten (0,5 dB möglich)
- Dynamikbereich bei UMTS: 80 dB, bei GSM: 28 dB
- Beim Verbindungsaufbau: Kleine Leistung (< 1mW)
- Soft bzw. Softer Handover: Verbindung zu mehreren Zellen gleichzeitig

Das für die nachfolgenden Untersuchungen verwendete Mobiltelefon Nokia 6650 gehört der Leistungsklasse 4 an und hat damit eine Ausgangsleistung von 21 dBm bzw. 125 mW.

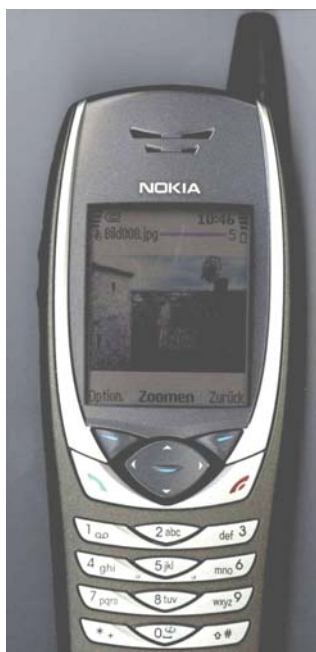


Abbildung 55: Für die UMTS-Messungen verwendetes Telefon Nokia 6650 (UMTS, GSM 900 und GSM 1800, angegebener SAR-Wert 0,64 W/kg) mit der Monitorsoftware von Focus Infocom WCDMA

6.1 UMTS-Messungen bei einem Telefonat im Raum

Rahmenbedingungen: NodeB (Basisstation bei UMTS), Entfernung: 650m, UMTS-Netzbetreiber 2, keine direkte Sicht, Proband: männlich, 26 Jahre

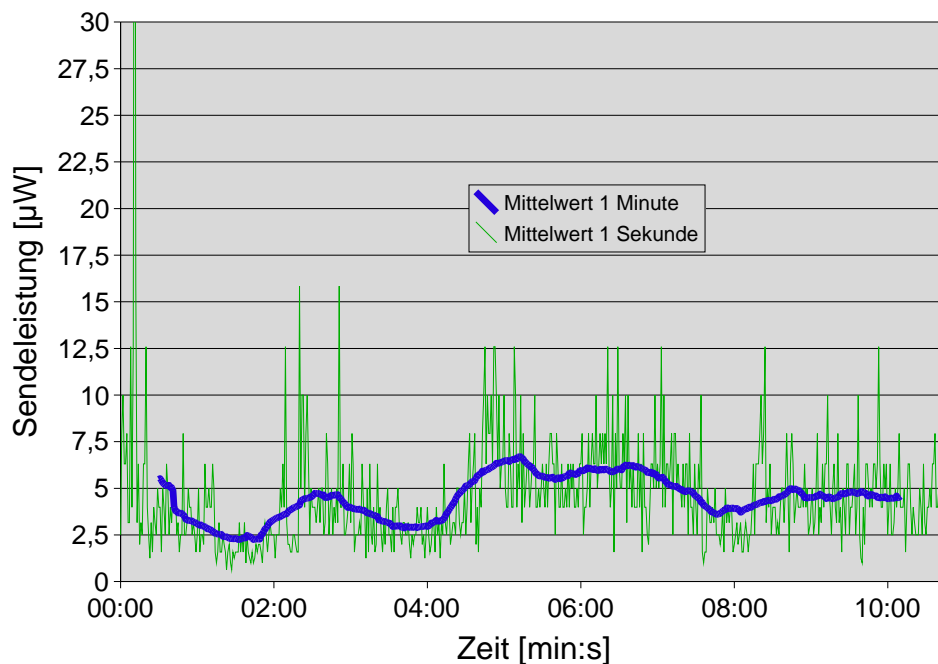


Abbildung 56: Sendeleistung bei UMTS, gemittelt über jeweils 1 Sekunde bzw. 1 Minute

Die UMTS-Messung für ein Telefonat im Raum (dargestellt in Abbildung 56) ergab einen mittleren Empfangspegel über 10 Minuten von -75 dBm und eine über 10 Minuten gemittelte Sendeleistung von -23 dBm = 4,6 µW.

Die schnelle Regelung der Sendeleistung sowie die hohe Auflösung der Regelung (im Vergleich zum „Stufenprofil“ von GSM) sind deutlich zu erkennen.

6.2 UMTS-Messung beim Gang durch ein Gebäude (CeBIT-Messehalle 13)



Abbildung 57: Versuchsperson 2, weiblich, 20 Jahre, beim Gang durch die CeBIT Messehalle 13 mit UMTS Nokia 6650; die Übertragung der Messdaten erfolgte mittels Bluetooth zu dem Laptop mit der Auswertungssoftware

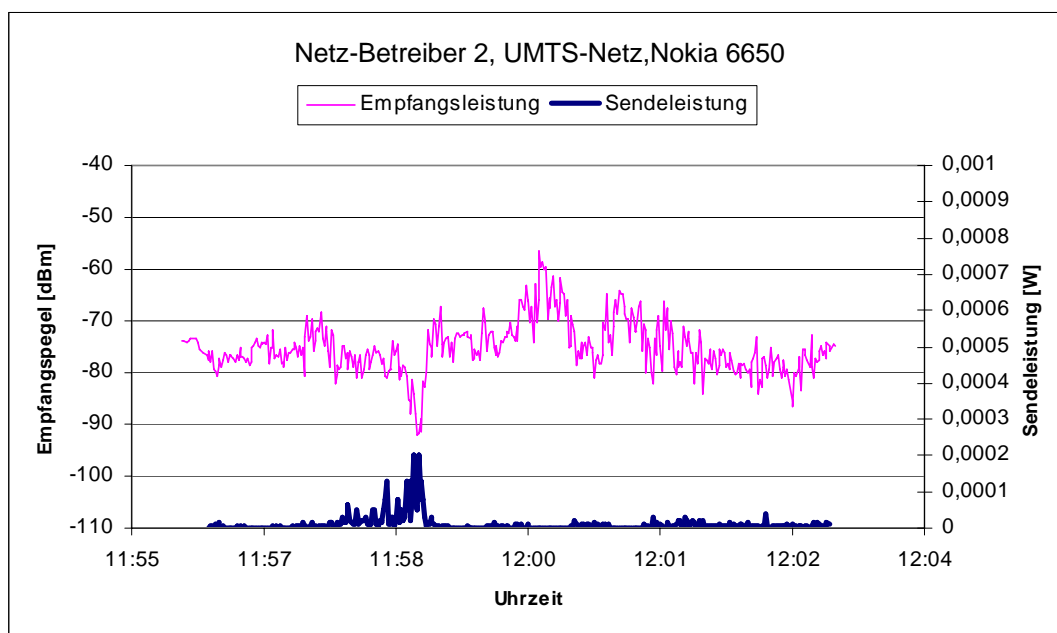


Abbildung 58: UMTS-Empfangs- und Sendeleistungsverlauf

In Abbildung 58 sind der Empfangspegel und die vom UMTS-Handy Nokia 6650 verwendete Sendeleistung während der Messung aufgetragen. Es ist gut zu erkennen, dass im Falle eines niedrigen Empfangspegels (dieser schwankt mit einer Dynamik von 30 dB während der Messung) die Sendeleistung erhöht wird.

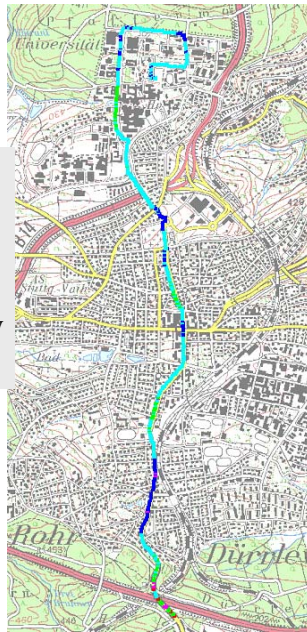
Die Sendeleistung bei UMTS ist sehr gering. Bei UMTS entfällt für die Bewertung der Sendeleistung die Teilung durch den Faktor 8, da bei UMTS ein kontinuierliches Signal im Gegensatz zu dem getakteten Signal bei GSM ausgesendet wird.

6.3 UMTS-Messungen bei Fahrt mit PKW (auf der Strecke von Oberaichen zur Universität Stuttgart)

Messfahrt

Sendeleistung

- < 10 nW
- 10 nW – 1 μ W
- 1 μ W – 100 μ W
- 100 μ W – 1 mW
- 1 mW – 10 mW



Anzahl Zellen

- 1
- 2
- 3



Abbildung 59: links Sendeleistung und rechts Zahl der jeweils eingebuchten Zellen

Abbildung 59 und 60 zeigen eine Messfahrt mit einem UMTS Handy im PKW. Die Länge der zurückgelegten Strecke betrug 6,6 km, die benötigte Fahrtzeit belief sich auf 17 Minuten. Im linken Bild sind jeweils die Sendeleistungspegel des UMTS Handys eingetragen, im rechten Bild sind jeweils die Anzahl der Zellen, in die das Handy eingebucht ist, eingezeichnet.

Bei UMTS findet kein "harter" Zellwechsel statt wie bei GSM, sondern ein "Soft"-Handover statt, bei dem das Handy gleichzeitig in mehreren Zellen eingebucht ist, bevor es sich endgültig für die stärkste Zelle entscheidet. Der über die PKW-Messfahrt gemittelte Empfangspegel beträgt -66 dBm, die mittlere Sendeleistung -10,178 dBm = 96 μ W

Messfahrt

Sendeleistung

- < 10 nW
- 10 nW – 1 μ W
- 1 μ W – 100 μ W
- 100 μ W – 1 mW
- 1 mW – 10 mW



Anzahl Zellen

- 1
- 2
- 3



Detailausschnitt:

Keine Erhöhung der Sendeleistung bei Handover

Abbildung 60: Detailausschnitt (Stadtbereich) der Messfahrt

6.4 UMTS und Datenübertragung

Messung der auftretenden UMTS-Sendeleistungen bei Datentransfer (z. T. während eines Sprachtelefonats)

Datum: 3. 2. 2005

Ort: Büroraum der Universität Stuttgart

Transfer einer 1,30MB großen Datei via http (e-mail-office von freenet.de)

Proband: männlich, 26 Jahre

Upload

Sendeleistung

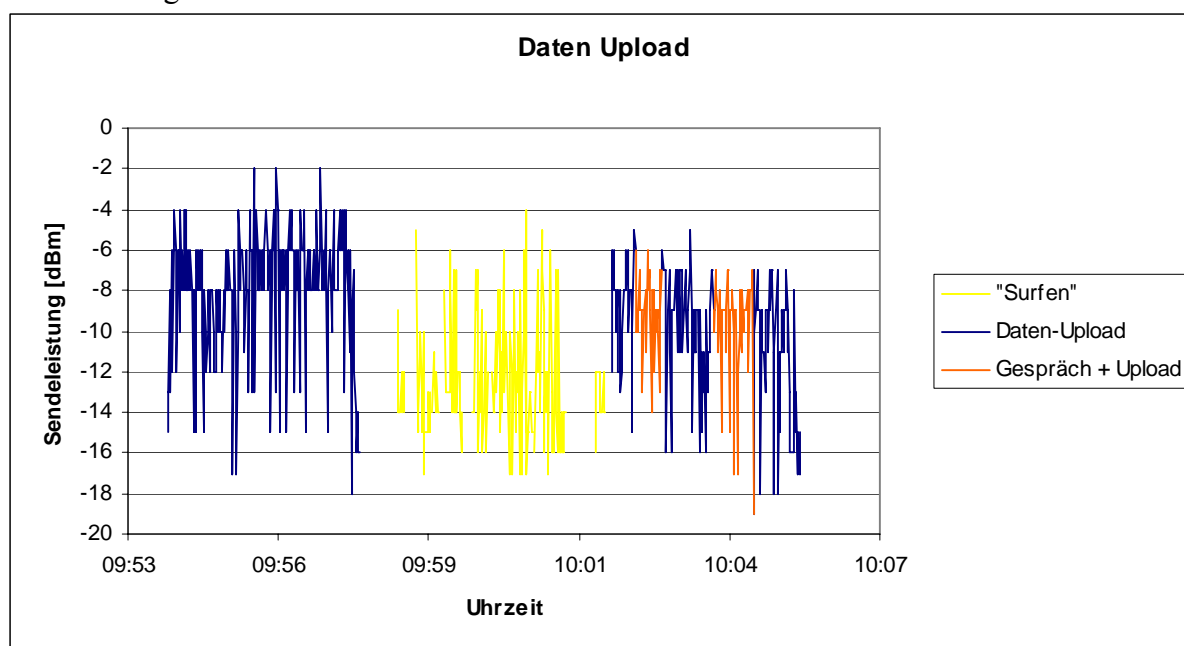


Abbildung 61: Sendeleistung bei UMTS, abhängig von verschiedener Dienstnutzung

Abbildung 61 zeigt die Sendeleistung in Abhängigkeit von verschiedenen Diensten:

- Datenübertragung in das Netz (Upload),
- Surfen,
- Gespräch und gleichzeitige Datenübertragung in das Netz (Upload).

Bei diesem Versuch ergab sich, dass bei dem Hinzukommen eines zusätzlichen Sprachtelefonats während der Datenübertragung keine höhere Sendeleistung auftrat, jedoch wird beim Surfen eine deutlich kleinere Leistung (ca. 3 dB im Mittel) verwendet.

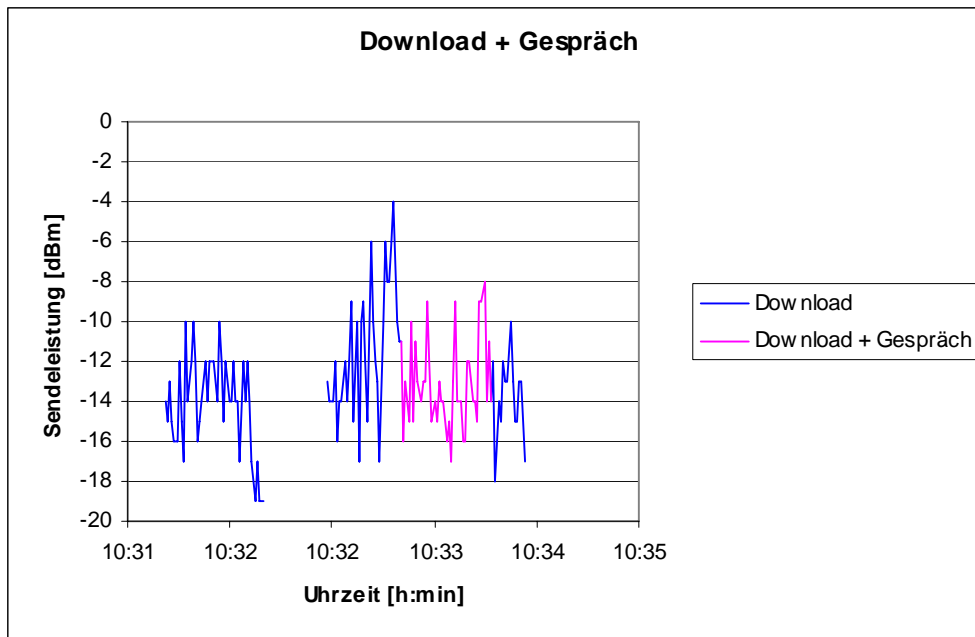


Abbildung 62: Sendeleistung als Funktion der verwendeten Dienste

Bei dem Versuch, der mit Abbildung 62 dokumentiert ist, ist zu erkennen, dass die Sendeleistung bei einem parallel zum Download geführten Gespräch in diesem Fall nicht erhöht wurde.

Jedoch zeigte sich, dass die Übertragungsrate für den Download beim Hinzukommen des Gespräches geringer wurde.

Tabellarische Auswertung der UMTS-Messungen

In Tabelle 7 sind die statistischen Mittelwerte für die in diesem Kapitel vorgestellten Messungen zusammengefasst.

Auffällig ist der (berechnete) SAR Wert, der in einer so niedrigen Größenordnung liegt, dass er mit dem in diesem Projekt verwendeten Messkopf nicht messbar war. Zu Beachten ist, dass die Sendeleistung in μW angegeben ist.

	Dauer [min]	Mittelwert SAR [W/kg]	Standardabweichung des SAR-Wertes [W/kg]	Mittelwert der Sendeleistung [μW]	Standardabweichung der Sendeleistung [μW]	Mittlerer Empfangspegel [dBm]	Standardabweichung des Empfangspegels [dBm]
Telefonieren im Büro	11	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	4,6	3,4	-75	-78
Gang durch Gebäude CeBIT	6	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	9,5	21,9	-72	-68
Fahrt Oberaichen - Uni	17	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,10	0,23	-63	-54
Daten Upload	12	0,08	0,06	135,9	99,5	Nicht gemessen	Entfällt, da keine Messung
Download + Gespräch	3	0,04	0,03	61,3	53,1	Nicht gemessen	Entfällt, da keine Messung

Tabelle 7: Zusammenfassung der UMTS-Messreihen

7. Vergleich der Projekt-Messergebnisse aus 2004 mit publizierten Messungen aus 1998

Eine wichtige Publikation ist die von 'Joe Wiart, Christian Dale, Ada Victoria Bosisio and Alain Le Cornec (publiziert in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 42, No. 4 vom November 2000' [2]) in der Messungen zur Sendeleistungsregelung eines Mobilfunkgerätes bei der Fahrt im Jahre 1998 in einem Fahrzeug im Raum Paris veröffentlicht wurden.

Mit diesen Messungen aus 1998 wurden die Projekt-Messergnisse bei der Autobahnfahrt im Mai 2004 verglichen.

Publikation (Wiart et al., IEEE TEC 2000):

Analysis of the Influence of the Power Control and Discontinuous Transmission on RF Exposure with GSM Mobile Phones

Eigene Messungen im Mai 2004

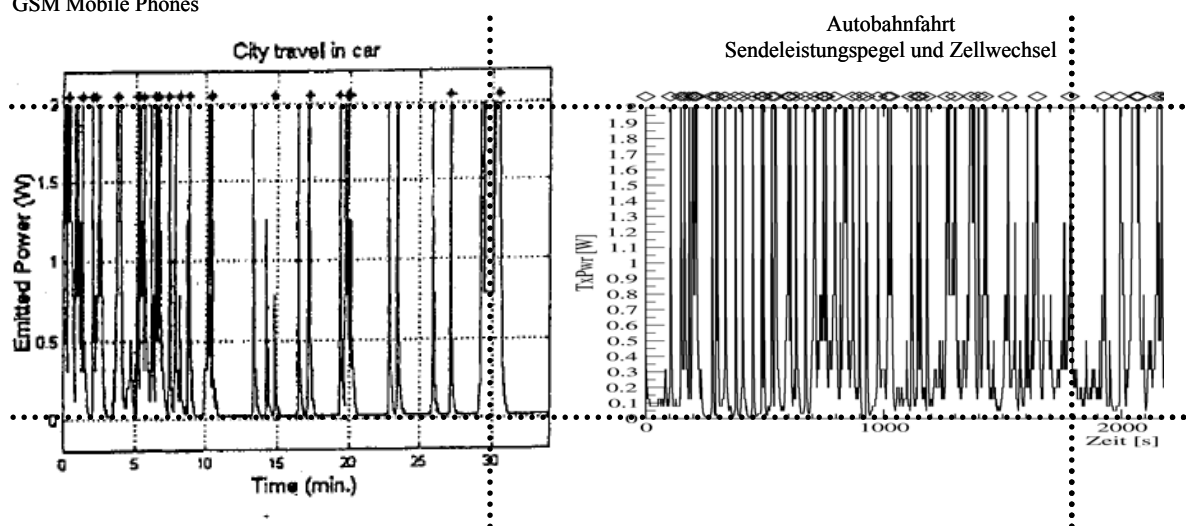


Abbildung 63: Vergleich der Wiartschen Messungen von 1998 mit den eigenen Messungen von Mai 2004

Abbildung 63 vergleicht die Messfahrt von 1998 (Publikation von Wiart et al. [2]) links mit der eigenen Messfahrt sechs Jahre später; rechts. Die Zeitbasis ist in beiden Fällen im gleichen Maßstab 30 Minuten bzw. 1800 Sekunden abgebildet. Auf der senkrechten Achse ist die maximale Sendeleistung identisch mit "Emitted Power [W]" identisch mit "TxPwr [W]" aufgetragen. Die maximale Sendeleistung eines GSM 900 MHz-Mobiltelefons ist mit 2 Watt angegeben (nachrichtlich: die mittlere Leistung beträgt aufgrund der Tatsache, dass der physikalische Kanal zwischen 8 Teilnehmern aufgeteilt wird und das Handy daher nur in 1/8 der Zeit sendet, nur 0,25 Watt).

In den Grafiken ist der Zellwechsel jeweils durch " \diamond " am oberen Rand markiert. Vergleicht man die beiden Grafiken, erkennt man den Anstieg der Sendeleistung beim Zellwechsel jeweils auf den Maximalwert und anschließend das GSM-typische Regelverhalten in Richtung eines reduzierten Sendeleistungspegels.

Bei unserer Fahrt im Mai 2004 (rechte Grafik der Abbildung 63) erkennt man eine viel höhere Zahl von Zellwechseln. Dies liegt zum einen daran, dass bei einer Autobahnfahrt eine größere Strecke zurückgelegt wird als in der gleichen Zeit bei einer Stadtfahrt und damit mehr Basisstationszellen durchfahren werden, zum anderen – und dies ist das entscheidende – sind im Laufe der letzten sechs Jahre sehr viele Basisstationen neu hinzugekommen. Bei heutzutage 70 Millionen Handynutzern in Deutschland lässt sich die erforderliche Kapazität in den GSM-Netzen nur dadurch bereitstellen, dass zusätzliche Basisstationen aufgebaut werden.

Um GSM flächendeckend aufzubauen, bräuchte man theoretisch alle 70 km nur eine Basisstation, da ein GSM-Netz aufgrund des Laufzeitverhaltens der Signale einen GSM-Radius um die Basisstation bis zu 35 km abdecken kann (70 km Durchmesser). Da in jedem Kanal jedoch nur acht Teilnehmer gleichzeitig sprechen können, benötigt man bei entsprechendem Verkehrsaufkommen zusätzliche Basisstationen, um den Gesprächsverkehr abwickeln zu können. Daher haben wir in Deutschland bei heute 70 Millionen Nutzern eine viel höhere Zahl von Basisstationen, als es der reinen Flächenabdeckung entsprechen würde. Aus diesem Grunde findet bei Fahrten heute eine viel höhere Zahl von Zellwechseln statt, als dies vor sechs oder zehn Jahren der Fall war.

Eine andere Aufgabe bei Projektbeginn war es, das Regelverhalten eines Mobiltelefons bei Gesprächsaufbau darzustellen. Der Gesprächsaufbau und die darauf folgende Messzeit erfolgen ohne Zellwechsel der Basisstation, so dass die Sendeleistung eines Mobiltelefons im stationären Zustand ohne Zellwechsel untersucht werden kann.

Regelverhalten in GSM-Netzen bei hoher Empfangsfeldstärke

Publikation (Wiert et al., IEEE TEC 2000):

Analysis of the Influence of the Power Control and Discontinuous Transmission on RF Exposure with GSM Mobile Phones

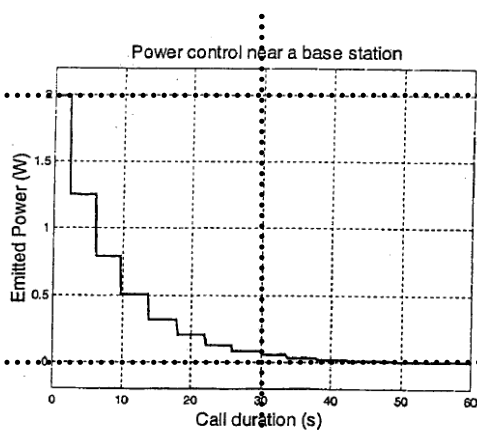


Fig. 2. Power emitted by a handset near the base station.

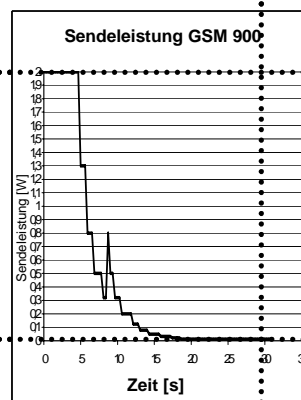
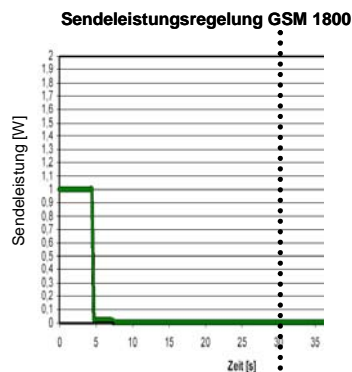


Abbildung 64: Regelverhalten in GSM-Netzen bei hoher Empfangsfeldstärke

Abbildung 64 zeigt links die Messungen von Wiert et al. [2] und rechts zwei Messungen aus diesem Projekt, einmal (unteres rechtes Bild) bei GSM 900 und (oberes rechtes Bild) bei GSM 1800.

Charakteristisch für das Regelverhalten ist das sehr schnelle Herunterregeln. Der Regelalgorithmus ist abhängig von der Software des Basisstationsherstellers, so dass er je nach Region und den dort verbauten Basisstationen unterschiedlich sein kann, jedoch immer wird die Leistung zügig heruntergeregelt, um die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Auch das Mobiltelefon beeinflusst indirekt durch die Antennencharakteristik das Regelverhalten.

8. Voruntersuchungen zur Verifikation der Berechnungsmodelle

8.1 Erstellung des Berechnungsmodells für das Mobiltelefon

In einem ersten Schritt wurde ein Berechnungsmodell für das Nokia 6150 Mobiltelefon entwickelt. Röntgenaufnahmen von der Front (siehe Abbildung 65) und von der Seite des Nokia 6150 ermöglichten es, die exakte Größe und Form der metallischen Objekte im Inneren zu bestimmen, ohne das Telefon auseinander zu nehmen. Diese Daten wurden dazu benutzt, ein realistisches Modell für das Feldberechnungsprogramm FEKO zu erzeugen, das in den anschließenden Berechnungen eingesetzt wurde.

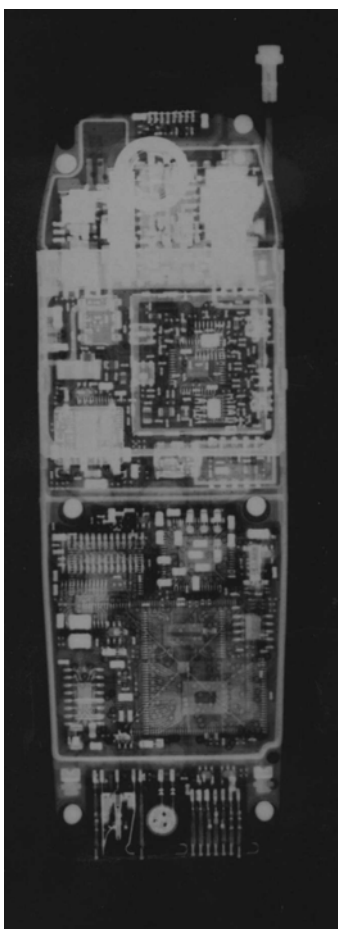


Abbildung 65: Röntgenaufnahme der Front des Nokia 6150 Mobiltelefons

8.2 Verifikation des Berechnungsmodells für das Mobiltelefon durch Messungen an einem Boxphantom

8.2.1 Beschreibung des Aufbaus

Zunächst wurden Vorberechnungen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener geometrischer Parameter des Telefons auf die Nahfeldergebnisse zu untersuchen. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Anzahl der Windungen der Helixantenne und deren Größe nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Für die Untersuchung der Speisung wurde diese an drei verschiedenen Positionen angebracht:

- 1) am letzten Segment der Helixantenne,
- 2) am Fuß der Helixantenne,
- 3) am Fuß des Drahtsegmentes, das die Antenne mit dem Gehäuse verbindet.

An keiner dieser drei Positionen ergab sich eine nennenswerte Änderung in den Ergebnissen.

In einem nächsten Schritt wurde, bevor die Messungen und die Berechnungen mit dem Kopfphantom durchgeführt wurden, zunächst mit Hilfe eines vereinfachten quaderförmigen Plexiglasphantoms (Abmessungen: 300 x 220 x 135 mm³) ein Vergleich zwischen dem FEKO-Modell des Mobiltelefons und einem realen Telefon bei einer Frequenz von 900 MHz vorgenommen. Der Grund für die Verwendung eines quaderförmigen Phantoms war, mögliche Unterschiede in der Geometrie und der Positionierung des realen Phantoms bzw. des Phantommodells weitestgehend auszuschließen.

Alle Messungen wurden mit einer Flüssigkeit vorgenommen, die dieselben elektrischen Eigenschaften wie menschliches Muskelgewebe besitzt ($\epsilon_r = (49,5 + j 22,9)$). Für die Messungen mit dieser Flüssigkeit wurde deren Temperatur überwacht, um eine Änderung ihrer elektrischen Eigenschaften auf Grund von Temperaturveränderungen auszuschließen.

Die Entfernung zwischen dem Telefon und dem Plexiglasquader betrug 5 mm. Die Front des Telefons zeigte dabei parallel zur Bodenfläche des Quaders. Die Hörmuschel des Telefons wurde unter dem Zentrum des Quaders positioniert (siehe Abbildung 66 und Abbildung 67).



Abbildung 66: Positionierung des Mobiltelefons unter dem Plexiglasphantom – Draufsicht

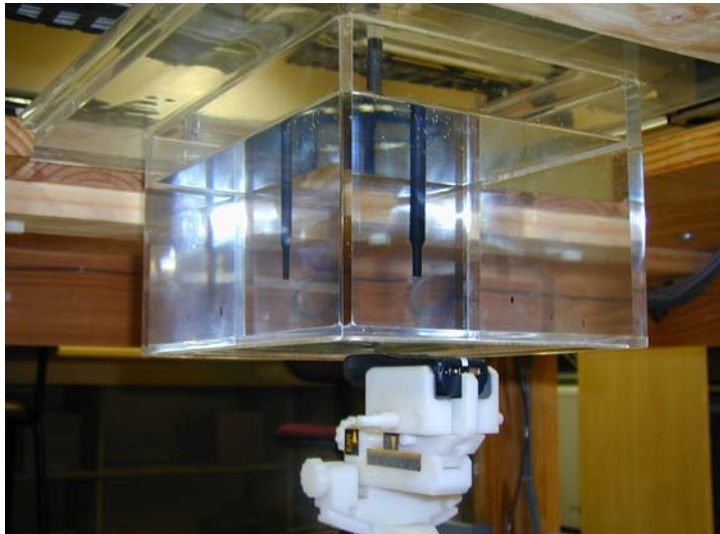


Abbildung 67:
Positionierung des Mobiltelefons
unter dem Plexiglasphantom –
Seitenansicht

Das weiße Objekt in Abbildung 67 ist die Halterung für das Telefon, die dazu verwendet wurde, eine genaue Positionierung zu erreichen. Die Halterung besteht aus Kunststoff, wodurch keine Feldbeeinflussung verursacht wird. Die schwarze Messsonde ist ebenfalls (durch das Plexiglas) zu erkennen.

Abbildung 68 zeigt die FEKO-Modelle des Telefons und der verwendeten Flüssigkeit, welche bei den Vorberechnungen verwendet wurden. Zu beachten ist, dass das Plexiglas im Modell vernachlässigt worden ist, um Rechenzeit zu sparen. Die Permittivität des Plexiglasses ist sehr viel geringer als die der Flüssigkeit (fast Faktor 14) und kann mit denselben Eigenschaften wie Luft angenähert werden. Diese Annahme wurde durch den Vergleich zweier Berechnungen verifiziert, bei denen sich keinerlei Unterschiede in den Ergebnisse ergaben. Somit ließ sich eine Beschleunigung der Berechnungen um etwa den Faktor 35 erzielen. Alle Berechnungen wurden mit der Momentenmethode im Programm FEKO durchgeführt.

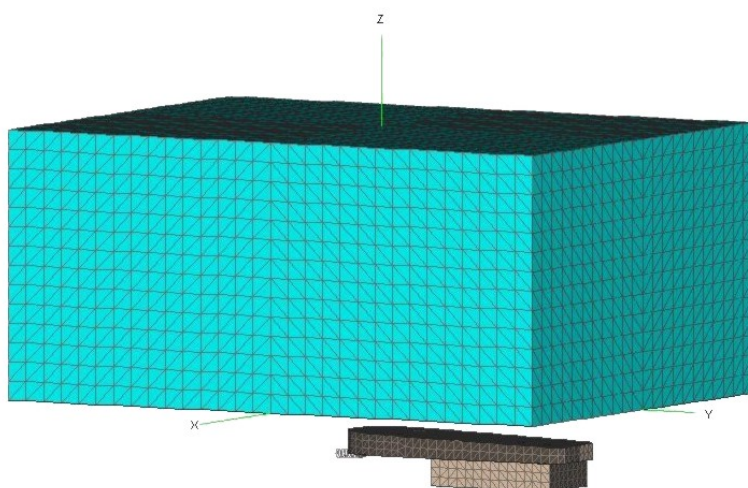
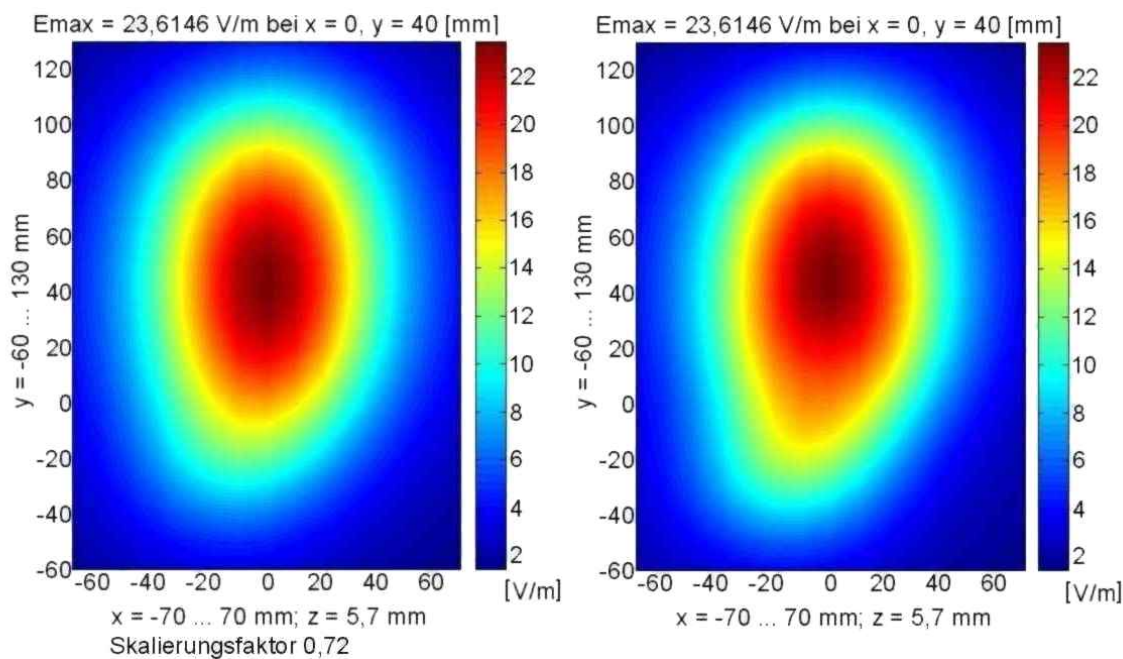


Abbildung 68: FEKO-
Berechnungsmodell des
Mobiltelefons und der
Flüssigkeit im quader-
förmigen Boxphantom

8.2.2 Ergebnisse

Abbildung 69 zeigt die Ergebnisse der Nahfeldmessung und -berechnung bei einer Frequenz von 900 MHz und einer Sendeleistung von 0,25 W in der xy-Ebene bei $z = 5,7$ mm. Die Farben repräsentieren den Betrag der elektrischen Feldstärke in V/m, wobei rot die maximale und blau die minimale Feldstärke darstellt.

Bei der Berechnung wurde von einer ideal angepassten Antenne ausgegangen. In der Realität ist aber eine Fehlanpassung zwischen Antenne und Mobiltelefon vorhanden. Ebenso treten Verluste im realen Telefon auf und es besteht eine kleine Toleranz bei der Vorgabe des Sendeleistungspegels in den Berechnungen und der Sendeleistung eines realen Mobiltelefons. Diese resultierende Gesamtabweichung kann aus den Ergebnissen bestimmt werden. In Abbildung 70 ist das Ergebnis für das E-Feld auf einer vertikalen Linie über der Hörmuschel des Telefons dargestellt. Die berechneten Ergebnisse wurden mit einem Faktor 0,72 skaliert, um so den Abweichungen während der Messungen Rechnung zu tragen.



**Abbildung 69: Elektrisches Nahfeld in der xy-Ebene für $z = 5,7$ mm;
links Berechnung, rechts Messung**

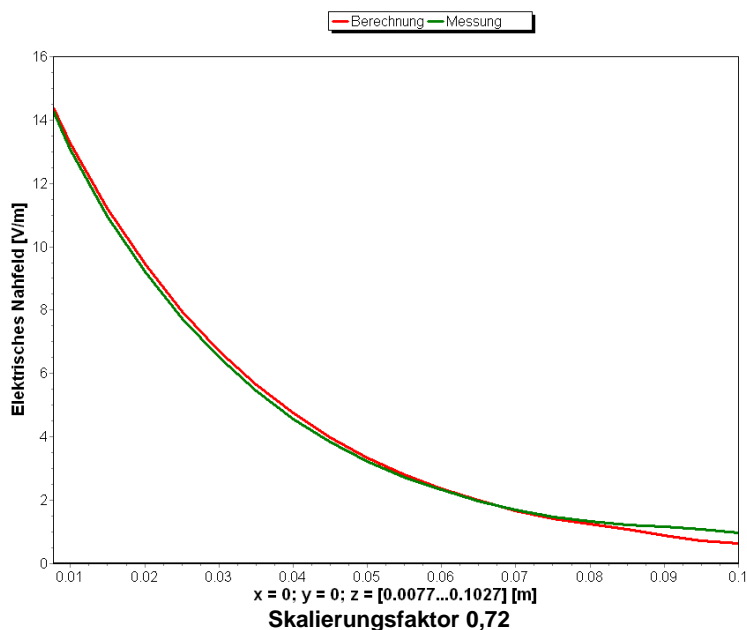


Abbildung 70: Rechnerisch und messtechnisch bestimmtes elektrisches Nahfeld entlang einer vertikalen Linie senkrecht über dem Telefon

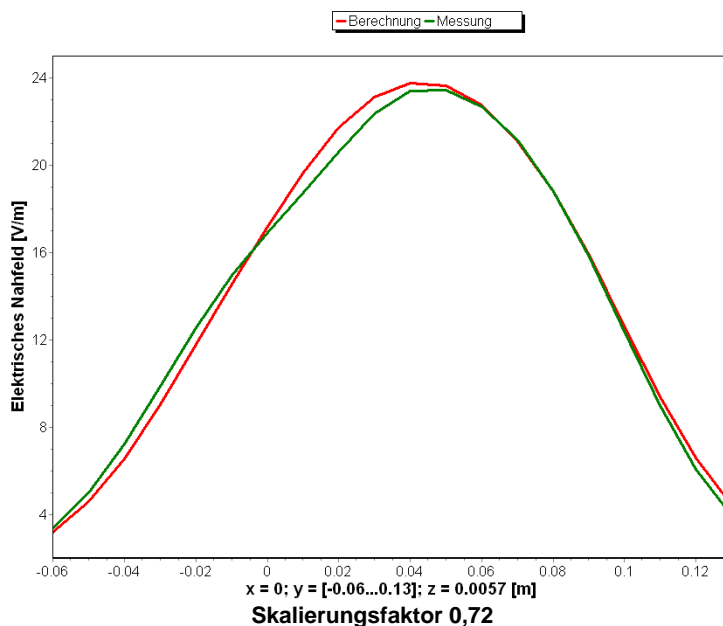


Abbildung 71: Rechnerisch und messtechnisch bestimmtes elektrisches Nahfeld entlang einer horizontalen Linie parallel zum Boxphantom

Abbildung 71 zeigt das Ergebnis des E-Felds auf einer horizontalen Linie entlang der Länge des quaderförmigen Boxphantoms bei $x = 0$ mm und $z = 5,7$ mm. Erneut wurde der Skalierungsfaktor von 0,72 verwendet.

8.3 Verifikation des Berechnungsmodells durch Messungen an einem realen Kopfphantom

Die Voruntersuchung im Unterabschnitt 8.2 hat gezeigt, dass das FEKO-Modell des Telefons eine gute Approximation des realen Telefons ist. Im nächsten Schritt wurden nun Messungen und Berechnungen bei der Frequenz 900 MHz durchgeführt, um das Kopfphantom zu verifizieren. Für GSM 1800 sind ähnliche Resultate zu erwarten (vgl. hierzu auch Kapitel 9.2). Durch den Vergleich von Messung und Berechnung soll gezeigt werden, dass das FEKO-Modell für das Telefon und das FEKO-Modell für den Kopf verlässliche Beschreibungen der Realität sind. Angelehnt an den Standard (mit älterer Version des SAM-Kopfphantoms) zur Bestimmung der SAR-Verteilung in einem menschlichen Kopf (EN 50361) [3] werden zwei spezifische Positionen des Telefons am Kopf untersucht, „Touch“ und „Tilt“, wie in Abbildung 73 und Abbildung 78 dargestellt und in den Unterabschnitten 8.3.1 und 8.3.3 beschrieben. Das E-Feld wurde für beide Positionen gemessen und berechnet und daraus der durchschnittliche SAR-Wert (gemittelt über ein 10 g schweres, würfelförmiges Volumen) rechnerisch bestimmt.

Ziel des Projekts ist die Bestimmung der SAR-Werte, die während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten. Diese alltäglichen Situationen z. B. bezüglich Haltung, Abstand, Kopfform etc. entsprechen natürlich nicht den im Standard festgelegten Szenarien, sondern variieren je nach Situation bzw. telefonierender Person. Deshalb spielt die Verwendung eines Kopfmodells, das nicht genau dem Standard entspricht, im hier vorliegenden Vergleich zwischen Rechnung und Messung keine Rolle. Wesentlich für die Validierung und Verifizierung der Berechnungsmodelle ist lediglich die Tatsache, dass für Messung und Berechnung identische Modelle zugrunde gelegt wurden, was der Fall ist.

Ein genauer Referenzpunkt auf der Außenseite des Kopfphantoms musste bestimmt werden, um sicher zu stellen, dass die Orientierung des Kopfes und des Telefons sowohl für die Messung als auch für die Berechnung identisch sind. Eine geringe Abweichung würde eine Ungenauigkeit bei dem Vergleich der Ergebnisse verursachen. Die dreidimensionale Oberfläche des Kopfphantoms ist in ihren x-, y- und z-Koordinaten gegeben, sodass das Modell sehr gut ausgerichtet werden kann. Auf dem Messmodell wurden zwei spezielle Punkte markiert, die Ohrposition und die Mundposition, wie sie in den Standards beschrieben sind. Ein Roboter wurde dazu verwendet, zwei Punkte auf der Außenseite des Phantoms zu markieren. Diese beiden Punkte wurden dann dazu verwendet, das FEKO-Modell entsprechend zu positionieren.

8.3.1 Beschreibung des Aufbaus für die „Touch“-Position

Die „Touch“-Position ist derart definiert, dass die Ohrmuschel des Telefons die Mitte des Ohrs des Kopfphantoms berührt und die Vorderseite die Wange des Phantoms. Die Mittellinie des Telefons muss in einer unsichtbaren Ebene, die mittig durch das Ohr und den Mund des Phantoms verläuft, liegen. Der Messaufbau und das FEKO-Modell für die „Touch“-Position sind in Abbildung 72 respektive Abbildung 73 dargestellt. Zu beachten ist, dass wie bei der Berechnung des Boxphantoms im vorherigen Fall hier das Fiberglasmaterial des Kopfphantoms im FEKO-Modell aus denselben Gründen wie im Unterabschnitt 3.2.1 vernachlässigt worden ist.



Abbildung 72: Messaufbau für die Messung des Nahfeldes mit dem Kopfphantom

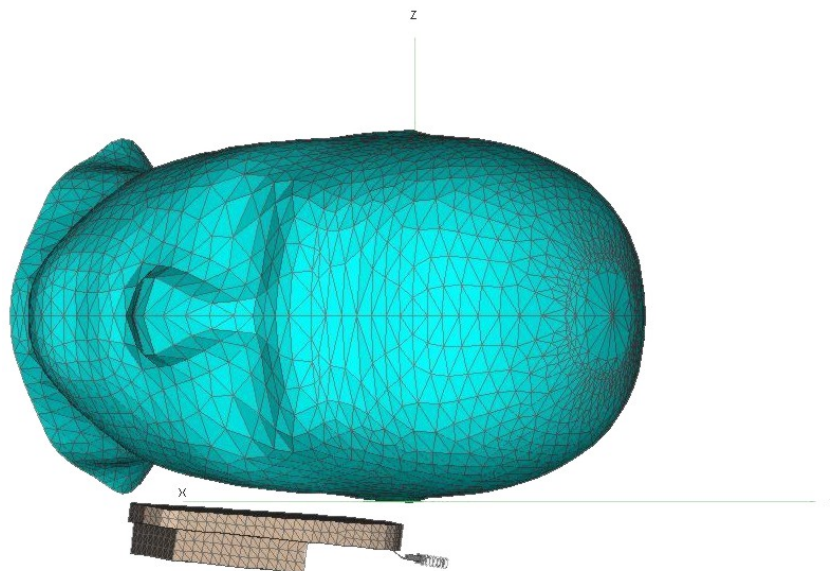


Abbildung 73: FEKO-Modell des Kopfphantoms mit Mobiltelefon in „Touch“-Position

8.3.2 Ergebnisse für die „Touch“-Position

Zunächst wurde eine Messung an der Oberfläche des Modells durchgeführt, um den Ort maximaler Feldstärke innerhalb des Phantoms zu bestimmen. Danach wurde das Feld in einem $30 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$ großen Volumen bestimmt, das einen 10 g schweren Würfel (gemäß dem europäischen Standard EN 50361) [3] um den Ort maximaler Feldstärke repräsentiert.

In Abbildung 74 sind die berechneten (links) und die gemessenen (rechts) Nahfeldwerte zur Bestimmung des SAR-Wertes in der xy-Ebene, die am nächsten am Telefon liegt ($z = 13,1 \text{ mm}$) aufgetragen. Der maximal gemessene Nahfeldwert ist $22,5 \text{ V/m}$. Die berechneten Feldwerte sind mit einem Faktor von 0,67 skaliert worden (vgl. Erläuterung in Unterabschnitt 8.2.2).

Zunächst wurden die elektrischen Feldstärken gemessen bzw. mit FEKO berechnet (Frequenz: 900 MHz, Sendeleistung 0,25 W). Es ergab sich hierbei für die Berücksichtigung der Abweichungen der Antenne ein Skalierungsfaktor von 0,67 beim Vergleich der maximalen Feldwerte von Messung und Berechnung. Es wurde anschließend ein durchschnittlicher SAR-Wert aus den Ergebnissen der Nahfeldmessung von $0,5 \text{ W/kg}$ am Ort $x = 42 \text{ mm}$ und $y = -40 \text{ mm}$ berechnet. Für den SAR-Wert aus der Berechnung mit FEKO ergab sich unter Berücksichtigung des Skalierungsfaktors ein Wert von $0,51 \text{ W/kg}$.

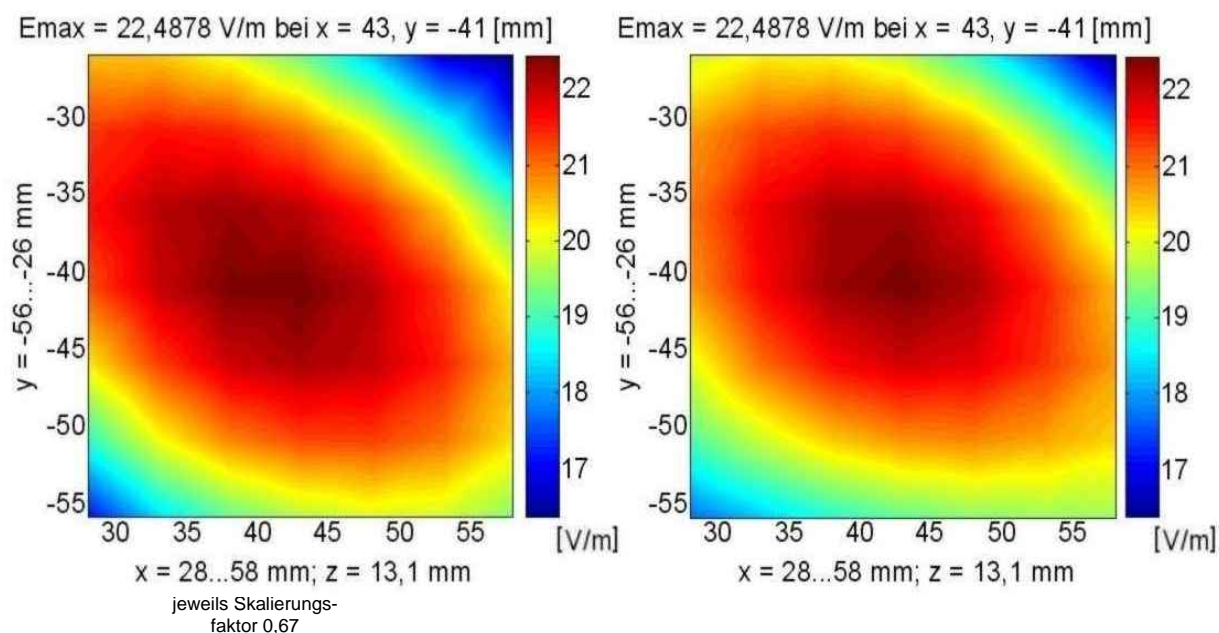


Abbildung 74: Verteilung der Werte des elektrischen Nahfelds in der xy-Ebene; links berechnete Werte, rechts gemessene

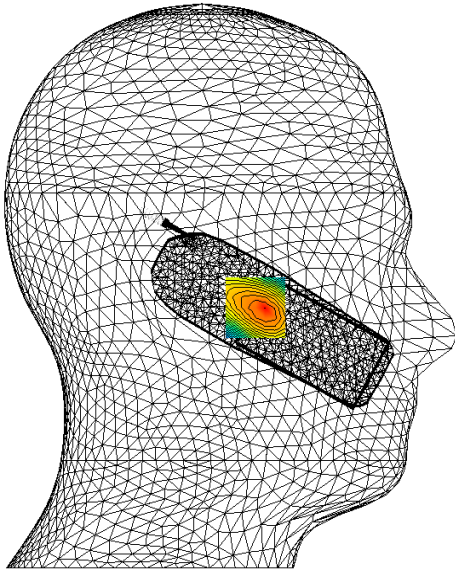


Abbildung 75: Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer Ebene. Die Ebene gibt die Position des 10 g Würfels an, der zur Berechnung des SAR-Werts verwendet wurde

Abbildung 75 zeigt eine Schnittebene für die FEKO-SAR-Berechnung. Die Ebene liegt an der Position, an der sich auch der 10 g-Würfel befindet.

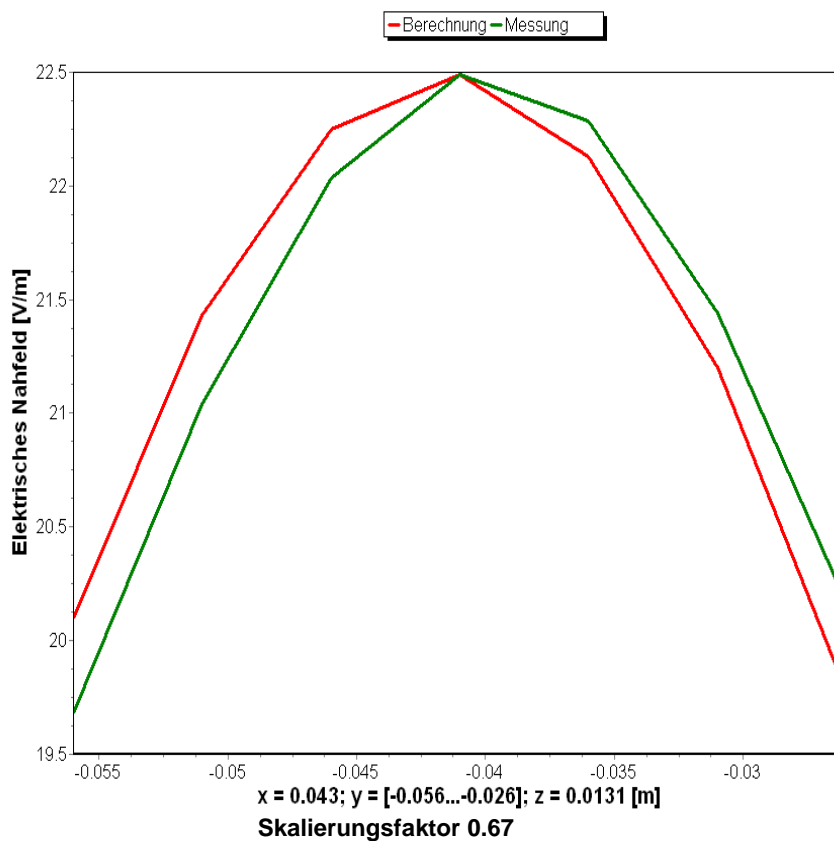


Abbildung 76: Berechnete (grün) und gemessene (rot) Nahfeldwerte entlang einer Linie für x = 43 mm und z = 13,1 mm

Abbildung 76 zeigt die berechneten (rot) und die gemessenen (grün) Nahfeldwerte auf einer Linie für $x = 43$ mm und $z = 13,1$ mm. Auch hier wurde ein Skalierungsfaktor von 0,67 verwendet. Es zeigt sich ein kleiner Versatz in y -Richtung von 1,8 mm zwischen der Messung und der Berechnung.

8.3.3 Beschreibung des Aufbaus für die „Tilt“-Position

Die tangentielle Linie, die dazu verwendet worden ist, das Telefon in der „Touch“-Position auszurichten, wurde um 15° um den Berührungspunkt am Ohr rotiert, weg von der Wange des Kopfphantoms. Der Messaufbau und das FEKO-Modell hierfür sind in Abbildung 77 und Abbildung 78 dargestellt.



Abbildung 77:
Messaufbau für die 15°
„Tilt“-Position

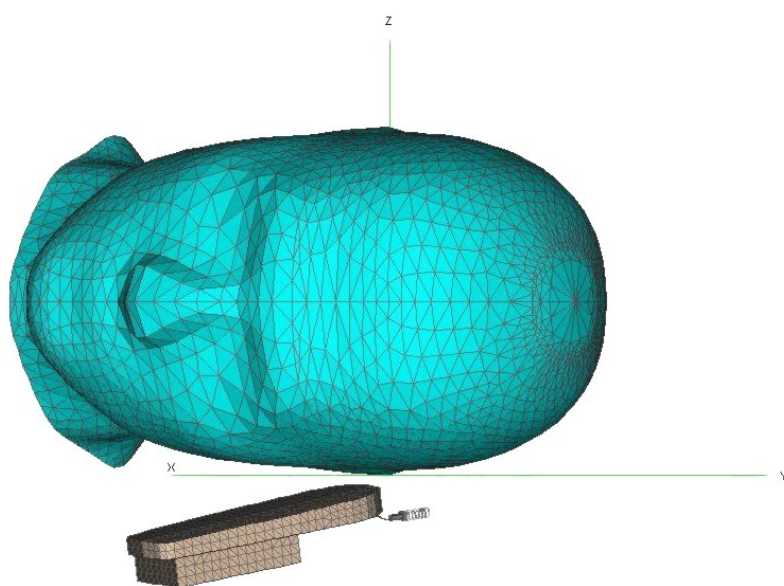


Abbildung 78: Modell des
Mobiltelefons und des
Kopfphantoms für die 15°
„Tilt“-Position

8.3.4 Ergebnisse für die „Tilt“-Position

Dasselbe Vorgehen, wie zur Bestimmung der SAR-Werte in der „Touch“-Position, wurde auch für die 15° „Tilt“-Position verwendet. Die Position des 10 g-Würfels, der sich für den Fall des maximalen SAR-Werts ergab, ist in Abbildung 79 dargestellt.

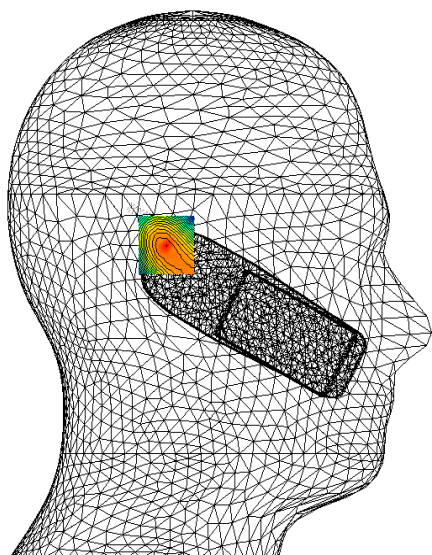


Abbildung 79:
Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer Ebene parallel zur Phantomoberfläche

Die nachfolgende Abbildung 80 zeigt die berechneten (links) und die gemessenen (rechts) Nahfeldwerte für die SAR-Berechnung in der xy-Ebene, die sich am nächsten zum Telefon befindet ($z = 9,7$ mm). Die Nahfeldwerte in Abbildung 82 reichen von 14 V/m bis 20,2 V/m. Die berechneten Werte wurden dabei mit einem Faktor 0,78 skaliert. Dieser Skalierungsfaktor weicht von dem der „Touch“-Position ab, da sich die Antennenfehlانpassung in beiden Fällen unterscheidet. Der Unterschied in den beiden Diagrammen in Abbildung 80 lässt sich auf kleine Abweichungen in den Winkeln bei der Positionierung des Telefons zurückführen. Diese ließen sich nur mit einem wesentlich höheren Messaufwand beheben.

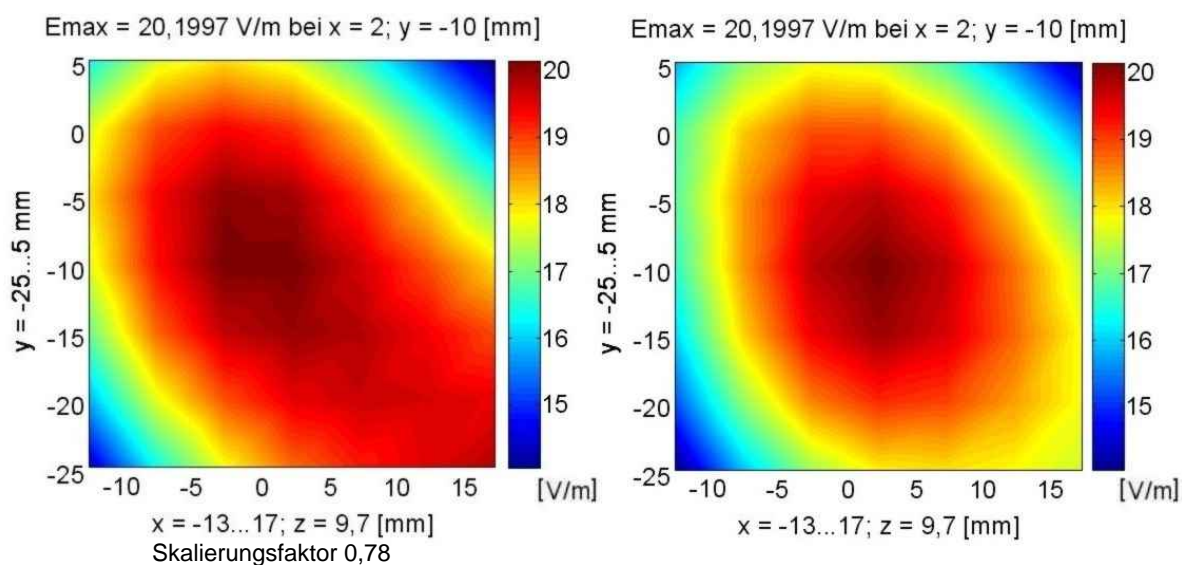


Abbildung 80: Berechnete (links) und gemessene (rechts) Werte des elektrischen Nahfeldes in der xy-Ebene über dem Mobiltelefon

Ein weiterer Unterschied besteht in der Geometrie des Telefonmodells und des realen Telefons. Dieser wirkt sich jedoch nicht besonders auf den durchschnittlichen, über das 10 g schwere, würfelförmige Volumen gemittelten SAR-Wert aus. Der örtlich gemittelte SAR-Wert wurde aus den Ergebnissen der berechneten Feldstärken in FEKO mit Berücksichtigung des Skalierungsfaktors für die Abweichungen zu 0,431 W/kg bestimmt. Der örtlich gemittelte SAR-Wert für die gemessenen Feldstärken beträgt 0,5 W/kg. Abbildung 81 zeigt einen Auszug aus dem Nahfeld entlang einer Linie durch die Mitte des SAR-Würfels für $x = 2$ mm und $z = 9,7$ mm. Es ergibt sich ein kleiner Versatz von 2 mm.

In Abbildung 82 sind die Nahfeldwerte dargestellt für die Berechnung (links) und die Messung (rechts) über einer größeren Fläche weiter entfernt vom Telefon ($z = 19,2$ mm). Im Diagramm wurde derselbe Skalierungsfaktor für die Antennenfehlanpassung von 0,78 verwendet, wie bei der vorherigen SAR-Bestimmung. Die maximalen Feldwerte in den beiden Diagrammen sind 15,3 V/m und 13,6 V/m. In beiden Diagrammen wurde dieselbe Farbskalierung verwendet. Der Unterschied in den beiden Diagrammen hat dieselben Ursachen, wie bereits oben erwähnt und beträgt im maximalen Fall 0,9 dB.

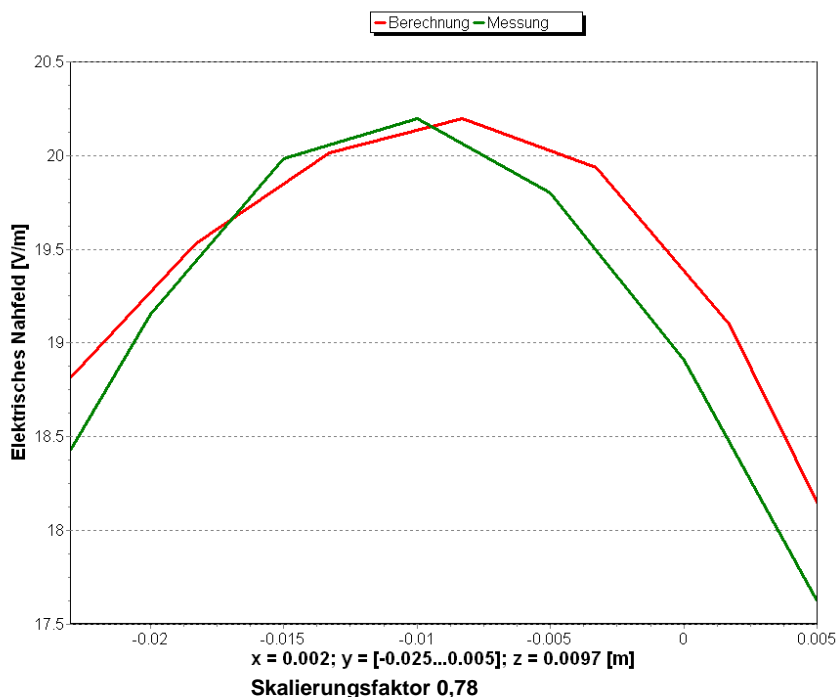


Abbildung 81: Nahfeld entlang einer Linie durch die Mitte des Würfels, der zur SAR-Bestimmung verwendet wurde

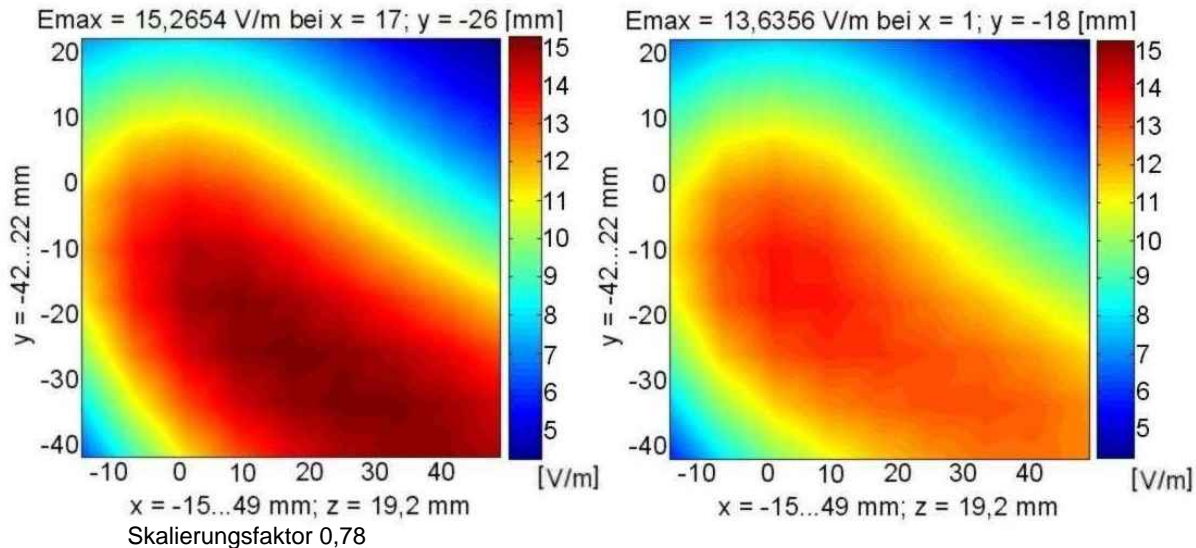


Abbildung 82: Verteilung der Werte der elektrischen Feldstärke in einer xy-Ebene weiter entfernt vom Mobiltelefon für Berechnung (links) und Messung (rechts)

9. Rechnerische Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Sendeleistung und SAR-Wert

9.1 Überblick über die Berechnungen

Für sechs ausgewählte Positionen des Mobiltelefons werden in diesem Kapitel Berechnungen des SAR-Wertes durchgeführt und beschrieben. Die Positionen des Mobiltelefons wurden anhand von Videoaufnahmen aus diesem Projekt, die ein alltägliches Telefonierverhalten zeigen, ausgewählt. Bei diesen Berechnungen wird sowohl das Modell des menschlichen Kopfes als auch ein Modell der Hand des Benutzers mit einbezogen (siehe Abbildung 83), um so eine realistische Modellierung dieser typischen Szenarien zu erlangen.

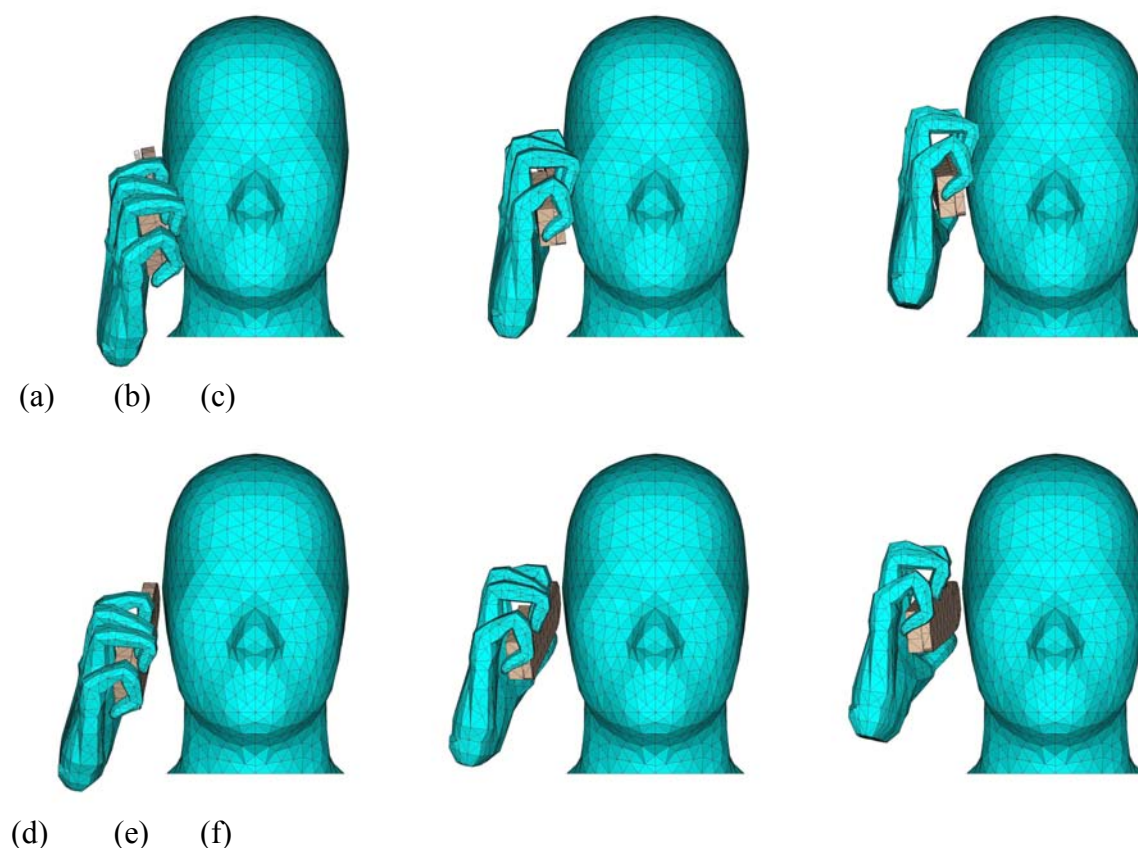


Abbildung 83: FEKO-Modelle (inklusive Hand- und Kopf-Modell) für die sechs verschiedenen Positionen des Mobiltelefons: „Touch“ Kinn (a), „Touch“ Mund (b), „Touch“ Nase (c) und „Tilt“ Kinn (d), „Tilt“ Mund (e), „Tilt“ Nase (f)

Die sechs Positionen wurden mit der „Touch“ (nahe am Kopf) und der 15° „Tilt“-Position (um 15° von der Wange weg gedreht) wie in Kapitel 3 definiert bestimmt. Die verschiedenen Rotationspositionen des Mobiltelefons ergeben sich aus den Linien Ohr- Kinn, Ohr-Mund und Ohr-Nase. Die Berechnungen werden für drei Frequenzen durchgeführt. Es handelt sich dabei

um die Mittenfrequenzen der jeweiligen Sendefrequenzbänder für GSM 900, GSM 1800 und UMTS. Dies sind die drei Frequenzen 902,5 MHz, 1747,5 MHz und 1950 MHz. Für die Berechnungen wird ein homogenes Kopf- und Hand-Modell verwendet sowie ein Modell des bereits in Abschnitt 3.1 beschriebenen Nokia 6150 Mobiltelefons. Die Sendeleistung des Mobiltelefons beträgt bei allen nachfolgenden Berechnungen 0,125 W.

Der Wert von 125 mW für die Sendeleistung wurde gewählt, da es sich um einen realistischen Wert handelt, der in der Praxis auch auftreten kann. Jedoch ist der absolute Wert der Sendeleistung für die hier durchgeführten SAR Berechnungen zweitrangig, da ein linearer Zusammenhang zwischen der Sendeleistung eines Mobiltelefons und der daraus resultierenden SAR-Werte gegeben ist.

Die Ergebnisse für den SAR-Wert bei einer beliebigen Sendeleistung können somit durch Skalierung einfach bestimmt werden, was in den Kapiteln 5 und 6 auch so angewandt wird. Zu beachten ist hierbei, dass bei den Berechnungen programmbedingt mit einer kontinuierlich gesendeten Leistung gerechnet worden ist und die Mobiltelefone in der Realität nur in einem von acht Zeitschlitzten senden. Dies bedeutet, dass eine bei den Berechnungen zu Grunde gelegte kontinuierliche Sendeleistung von 125 mW, in der Praxis einer Sendeleistung des Mobiltelefons von 1 W ($1/8 * 1 \text{ W} = 125 \text{ mW}$) entspricht.

In einem ersten Abschnitt werden numerische Konvergenztests für das Kopf- Hand- und Mobiltelefonmodell durchgeführt, um ein genaues Modell zu erhalten das gleichzeitig möglichst wenig Speicherplatz benötigt. Anschließend werden die Ergebnisse für die Berechnungen des über 10 g örtlich gemittelten Peak-SAR-Wertes für die verschiedenen Frequenzen und sechs unterschiedlichen Mobiltelefonpositionen sowie eine Sendeleistung von 125 mW getrennt für Kopf und Hand angegeben. Ebenso ist der über das gesamte Volumen gemittelte SAR-Wert für alle untersuchten Fälle dargestellt.

9.2 Konvergenztests

Es werden Konvergenztests für die Frequenzen 900 MHz und 1800 MHz durchgeführt. Die Modelle des 1800 MHz Konvergenztests werden anschließend auch für die Berechnungen im UMTS-Band eingesetzt, da die Differenz in den Frequenzen der beiden Bänder sehr gering in Bezug auf die Modellsegmentierung ist. Zuerst wird ein Konvergenztest mit dem Kopf-Modell durchgeführt, anschließend mit dem Hand-Modell und abschließend mit dem Modell des Mobiltelefons. Die Konvergenztests werden alle für die „Touch“-Position und mit einem Vorgänger-Modell des IEEE SAM-Phantoms nach IEEE SC C34 / Sub Committee 2 [34] durchgeführt.

9.2.1 Konvergenztest für das Kopf-Modell

Die Konvergenz des Kopf-Modells wird ermittelt durch den Vergleich der Nahfelder entlang der in Abbildung 84 dargestellten Linien für die beiden ausgewählten Frequenzen.

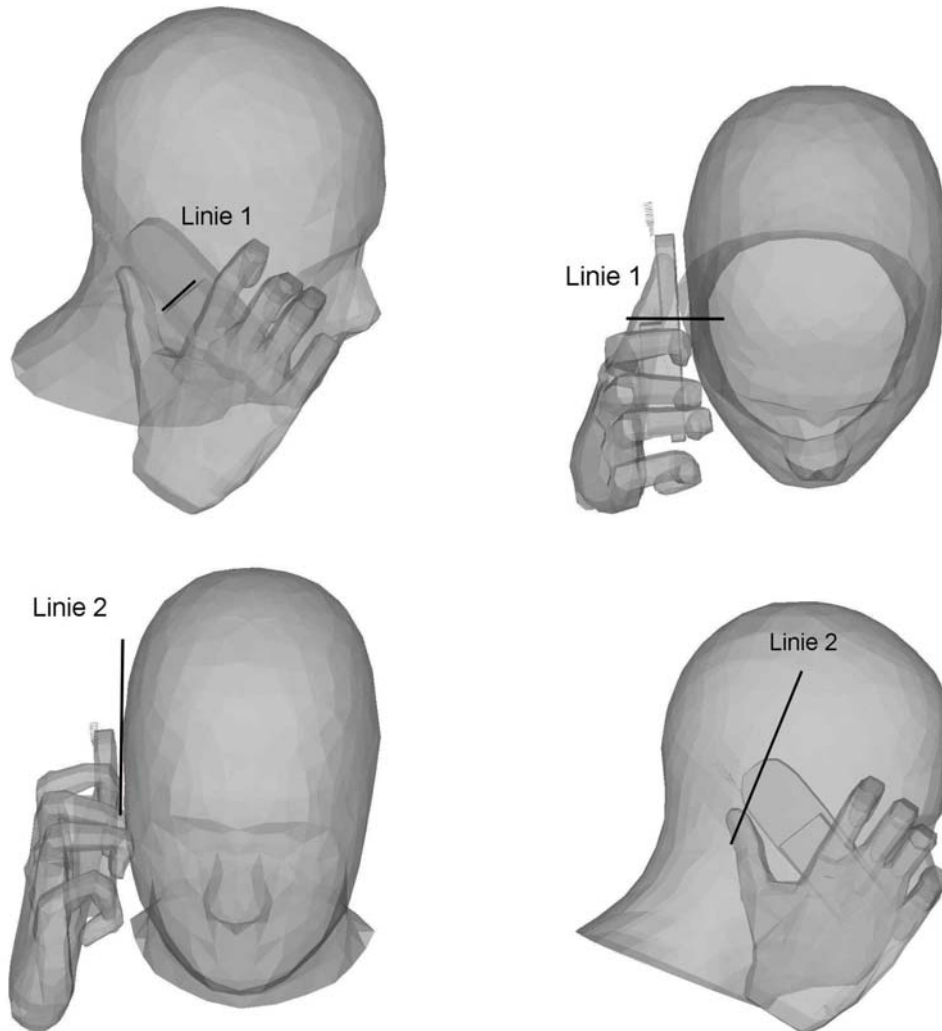


Abbildung 84: Verschiedene Ansichten der Linien zur Bestimmung des elektrischen Nahfelds für die Konvergenzuntersuchung des Kopf-Modells: Linie 1 (oben) und Linie 2 (unten)

900 MHz

Es werden Berechnungen durchgeführt mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Kopf-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 33 \text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{15} = 22,2 \text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{22} = 15,1 \text{ mm}$.

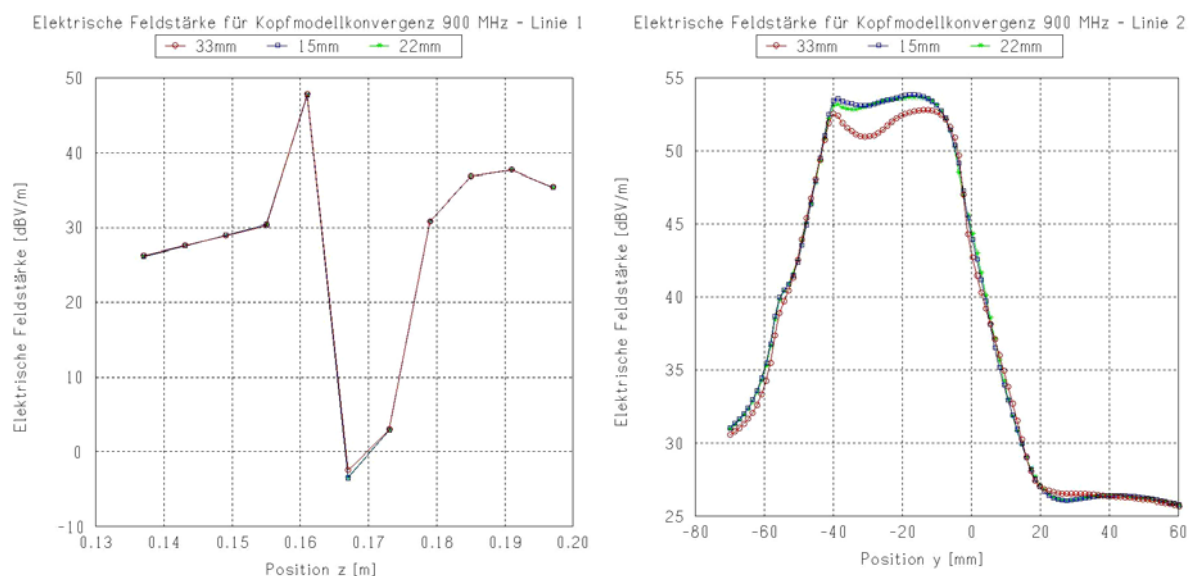


Abbildung 85: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Kopf-Modells bei 900 MHz

In Abbildung 85 ist zu erkennen, dass die Nahfeldwerte sehr ähnlich sind für die verschiedenen Segmentierungen. Entlang Linie 2 weichen die Werte für das grobe Netz ein wenig ab, für die beiden feineren stimmen sie jedoch gut überein, weswegen für die nachfolgenden Untersuchungen eine Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 22,2 mm gewählt wird.

1800 MHz

Für diesen Fall werden Berechnungen mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Kopf-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 16,7 \text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{15} = 11,1 \text{ mm}$ durchgeführt.

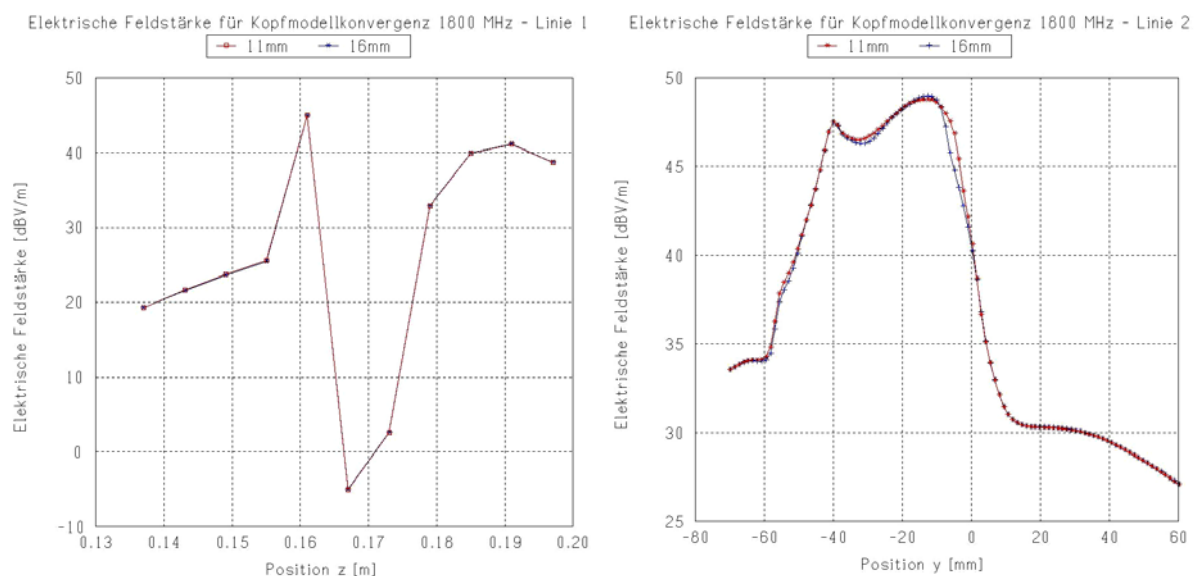


Abbildung 86: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Kopf-Modells bei 1800 MHz

In Abbildung 86 ist zu erkennen, dass die Nahfeldwerte entlang beider Linien sehr ähnlich sind für die verschiedenen Segmentierungen. Daher wird für die nachfolgenden Untersuchungen bei GSM 1800 und UMTS das gröbere Netz mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 16,7 mm gewählt.

9.2.2 Konvergenztest für das Hand-Modell

Die Konvergenz des Hand-Modells wird durch den Vergleich der Nahfelder entlang der in Abbildung 87 dargestellten Linien für die beiden ausgewählten Frequenzen ermittelt.

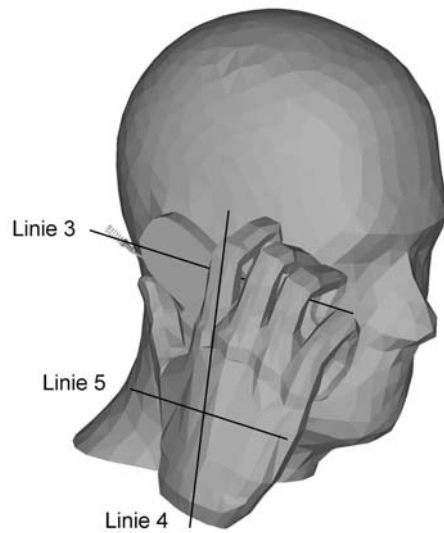


Abbildung 87: Linien zur Bestimmung des elektrischen Nahfelds für die Konvergenzuntersuchung des Hand-Modells

900 MHz

Es werden Berechnungen mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Hand-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 33\text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{15} = 22,2\text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{22} = 15,1\text{ mm}$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 88 dargestellt. Die Nahfeldwerte für die Linien 3 und 4 sind sehr ähnlich für die verschiedenen Segmentierungen. Linie 5 ist sehr nah am Hand-Modell. Die geometrischen Unterschiede in der Segmentierung mit einem groben und einem feinen Netz verursachen eine Berührung der Linien im einen Fall. Dies hat eine kleinere Abweichung der Nahfeldwerte in diesem Punkt zur Folge. Für die nachfolgenden Untersuchungen bei GSM 900 wird eine Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 22,2 mm gewählt.

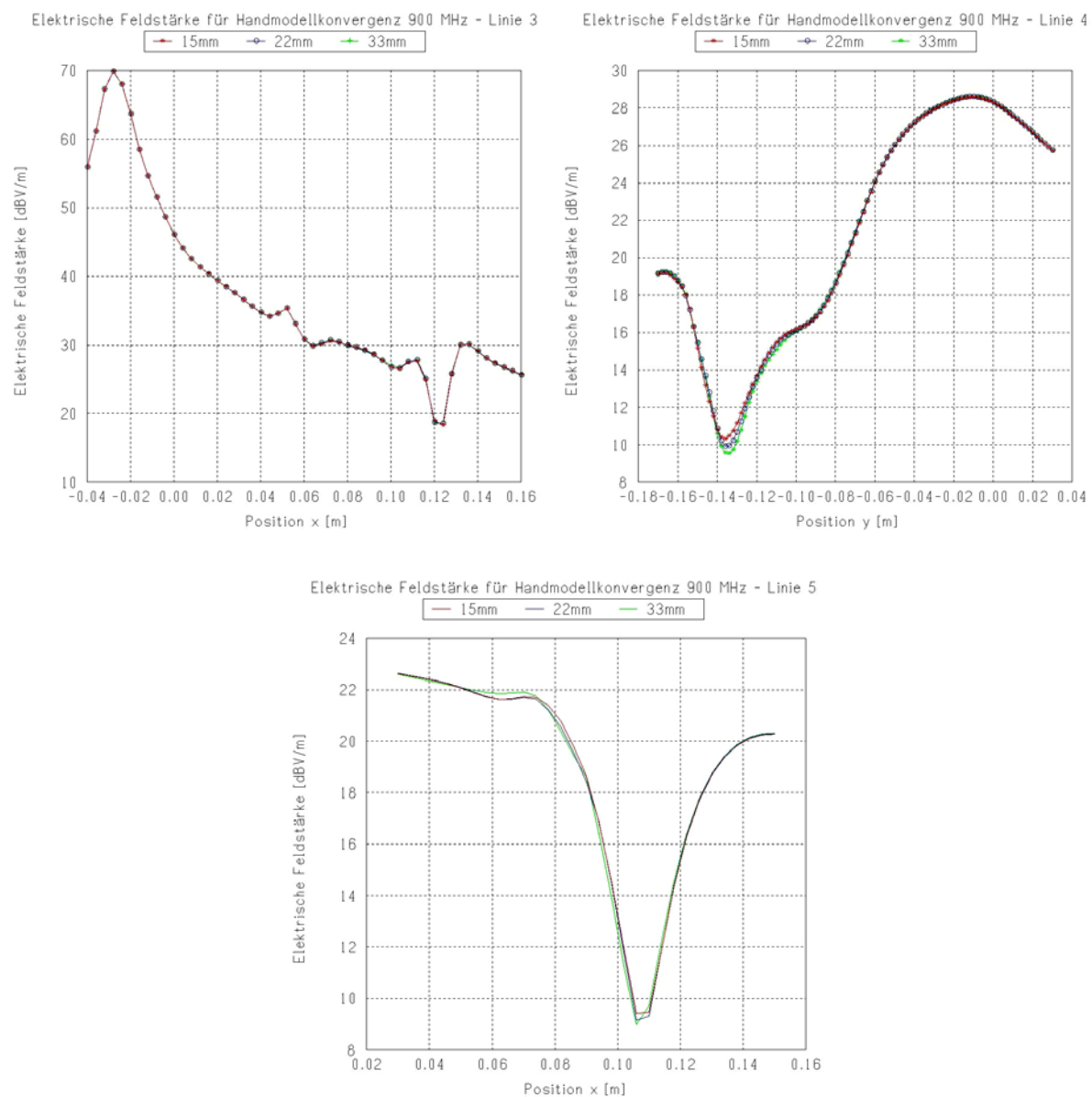


Abbildung 88: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Hand-Modells bei 900 MHz

1800 MHz

Für diesen Fall werden Berechnungen mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Hand-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 16,7 \text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{15} = 11,1 \text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{22} = 7,6 \text{ mm}$ durchgeführt.

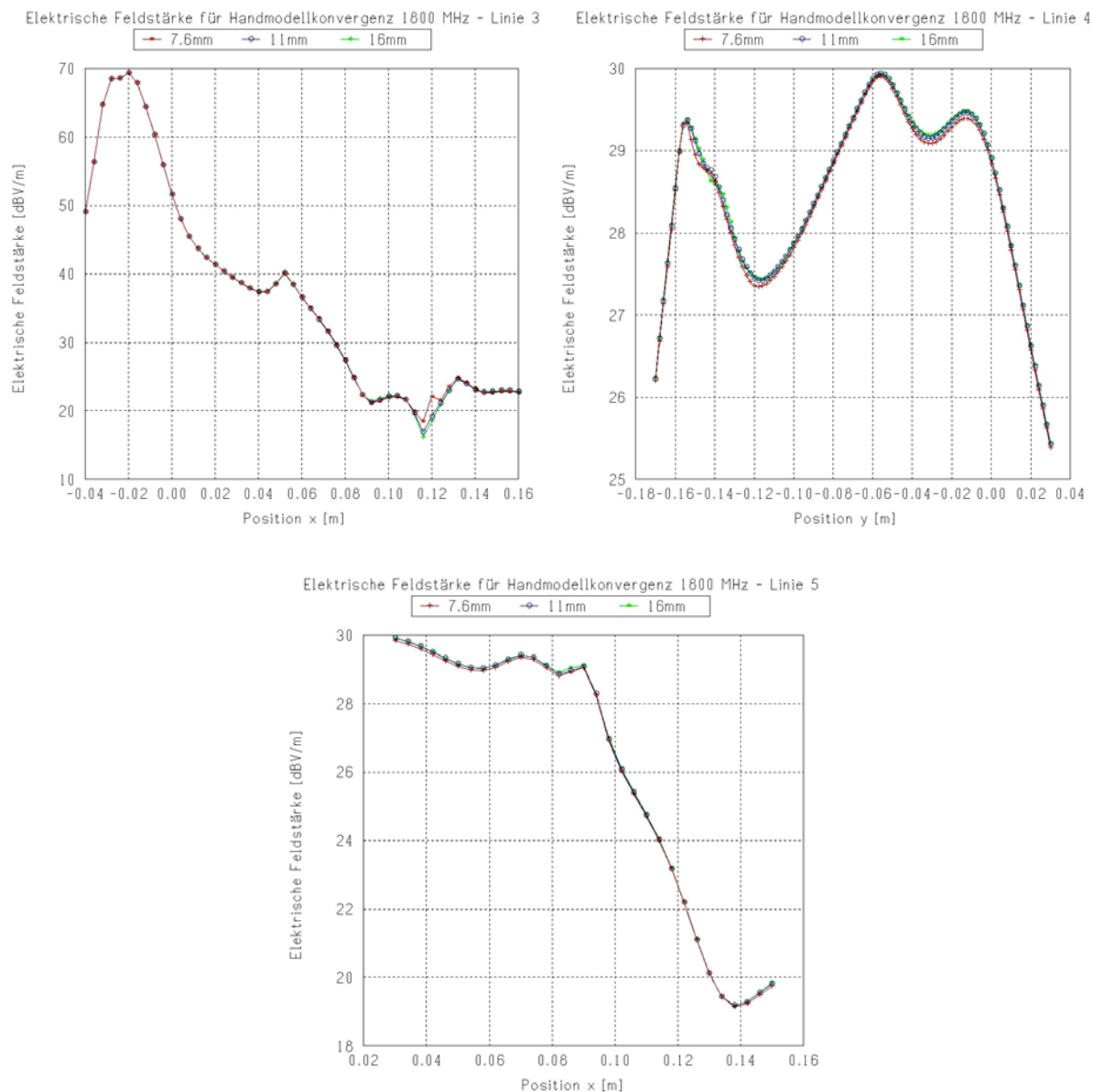


Abbildung 89: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Hand-Modells bei 1800 MHz

In Abbildung 89 ist zu erkennen, dass für alle Linien eine gute Übereinstimmung der Nahfeldwerte erreicht wird. Daher wird für die nachfolgenden Untersuchungen eine Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 16,7 mm gewählt.

9.2.3 Konvergenztest für das Mobiltelefon-Modell

Für diesen Konvergenztest werden erneut die elektrischen Nahfeldwerte entlang der bereits festgelegten Linien verglichen. Die Antenne des Mobiltelefons ist mit sehr kleinen Segmenten und Dreiecken vernetzt und wird beim Konvergenztest nicht verändert. Lediglich die Vernetzung des Mobiltelefonkörpers wird variiert. Das Modell ist in Abbildung 90 dargestellt.

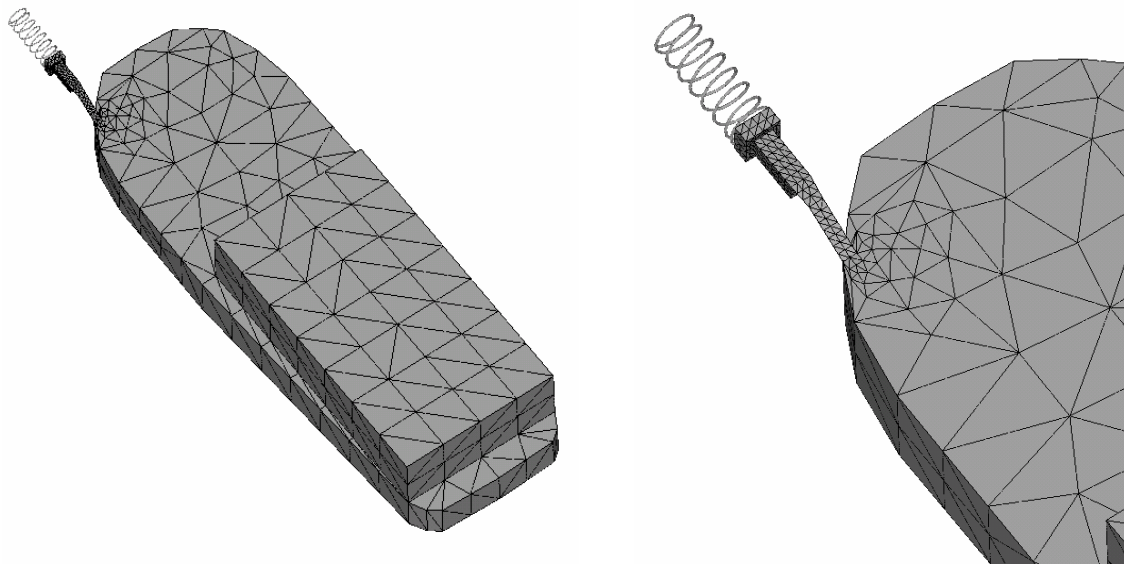


Abbildung 90: Numerisches Berechnungsmodell des Nokia 6150 Mobiltelefons

900 MHz

Es werden Berechnungen durchgeführt mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Mobiltelefon-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 33 \text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{15} = 22,2 \text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{22} = 15,1 \text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{33} = 10 \text{ mm}$.

In Abbildung 91 ist zu erkennen, dass die Nahfeldwerte entlang der Linien 2, 3 und 5 sehr ähnlich sind für die unterschiedlichen Vernetzungen. Unterschiede treten für Linie 1 auf, da dort die Linie durch das Mobiltelefon verläuft und die Feldwerte Null sein sollten. Für den Fall GSM 900 wird für die anschließenden Untersuchungen eine Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 15,1 mm gewählt.

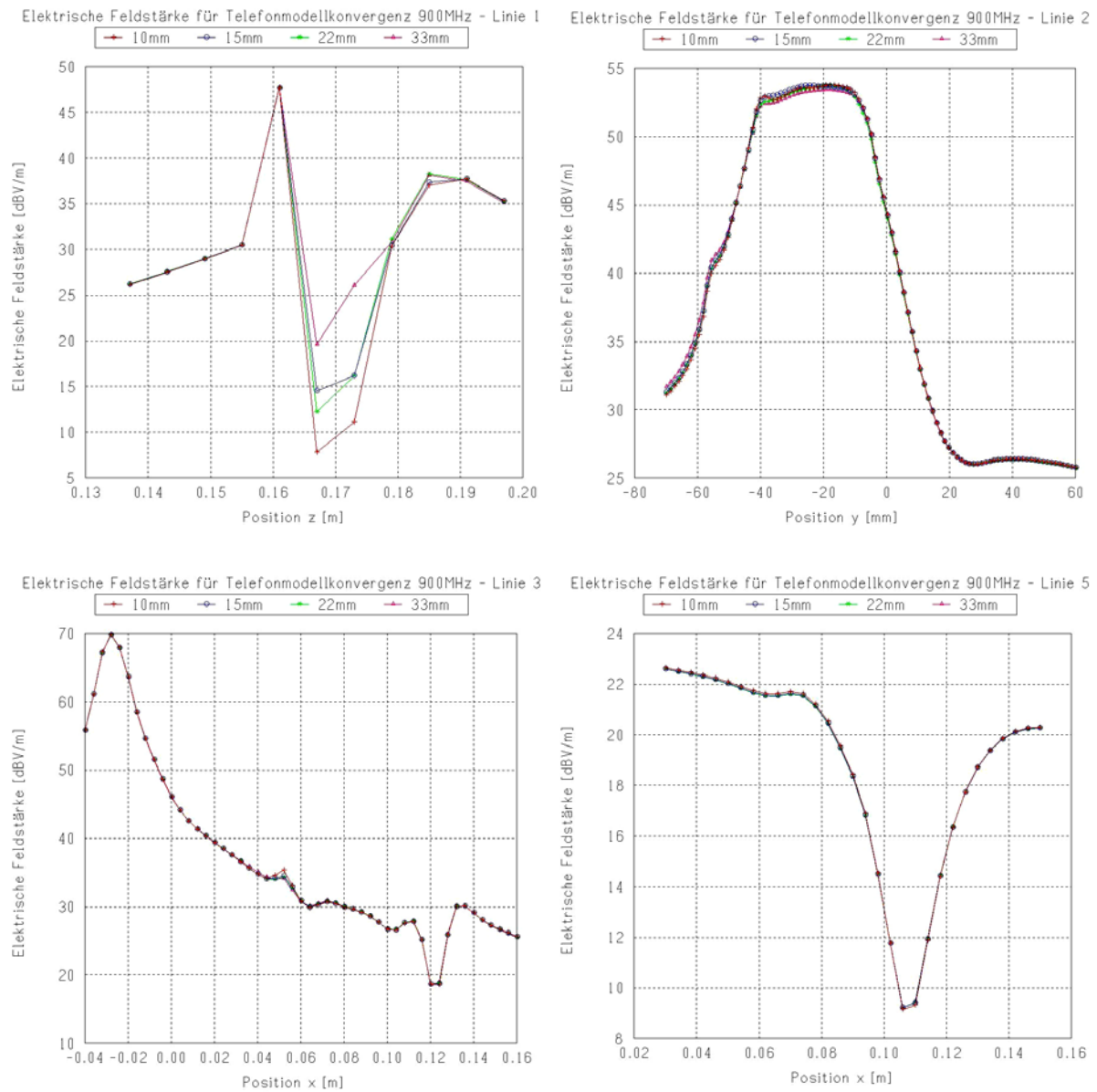


Abbildung 91: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Mobiltelefon-Modells bei 900 MHz

1800 MHz

Für diesen Fall werden Berechnungen mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke des Mobiltelefon-Modells von $\frac{\lambda_0}{10} = 16,7 \text{ mm}$, $\frac{\lambda_0}{15} = 11,1 \text{ mm}$ und $\frac{\lambda_0}{22} = 7,6 \text{ mm}$ durchgeführt.

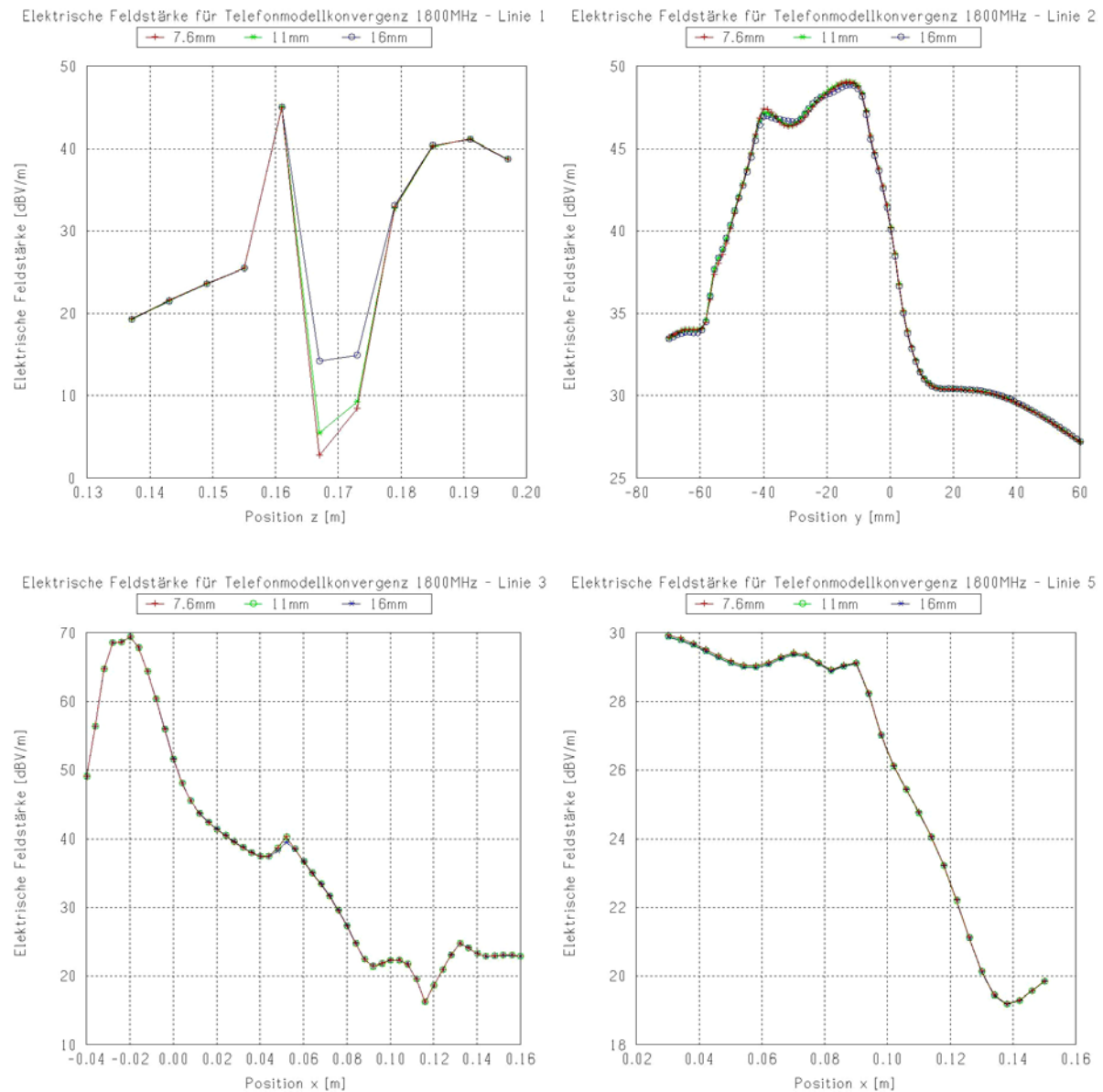


Abbildung 92: Werte des elektrischen Nahfeldes entlang unterschiedlicher Linien für verschiedene Segmentierungen des Mobiltelefon-Modells bei 1800 MHz

In Abbildung 92 ist zu erkennen, dass die Nahfeldwerte entlang der Linien 2, 3 und 5 erneut sehr ähnlich sind für die unterschiedlichen Vernetzungen. Für die Werte innerhalb des Mobiltelefons (Linie 1) treten die gleichen Abweichungen auf wie für 900 MHz. Für die nachfolgenden Untersuchungen bei GSM 1800 und UMTS wird ein Netz mit einer Kantenlänge der Segmentierungsdreiecke von 11,1 mm gewählt.

9.2.4 Zusammenfassung der Konvergenzuntersuchungen

Die für die verschiedenen Modelle notwendigen Vernetzungsparameter sind zur Übersicht noch einmal in der folgenden Tabelle 8 zusammengefasst:

Modelle	GSM 900 Untersuchungen	GSM 1800 und UMTS Untersuchungen
Kopf-Modell	$\frac{\lambda_0}{15} = 22,2 \text{ mm}$	$\frac{\lambda_0}{10} = 16,7 \text{ mm}$
Hand-Modell	$\frac{\lambda_0}{15} = 22,2 \text{ mm}$	$\frac{\lambda_0}{10} = 16,7 \text{ mm}$
Mobiltelefon-Modell	$\frac{\lambda_0}{22} = 15,1 \text{ mm}$	$\frac{\lambda_0}{15} = 11,1 \text{ mm}$

Tabelle 8: Zusammenfassung der Segmentierungsparameter für die verschiedenen Modelle

9.3 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der berechneten SAR-Werte für die verschiedenen Frequenzbänder und die sechs unterschiedlichen Mobiltelefonpositionen angegeben. Die Berechnungen wurden bei 902,5 MHz, 1747,5 MHz und 1950 MHz durchgeführt. Der Algorithmus zur Ermittlung des über 10 g Volumen gemittelten Peak-SAR-Wertes basiert auf [35] und dessen Implementierung ist in [36] dokumentiert. Der Peak-SAR-Wert ist für alle berechneten Szenarien jeweils getrennt für den Kopf und für die Hand angegeben (siehe auch Abbildung 93). Zusätzlich ist noch jeweils der über das gesamte Volumen gemittelte SAR-Wert angegeben. Die Sendeleistung beträgt bei allen Berechnungen 0,125 W, das Volumen des Kopfes 0,0055 m³ und das der Hand 0,000401 m³.

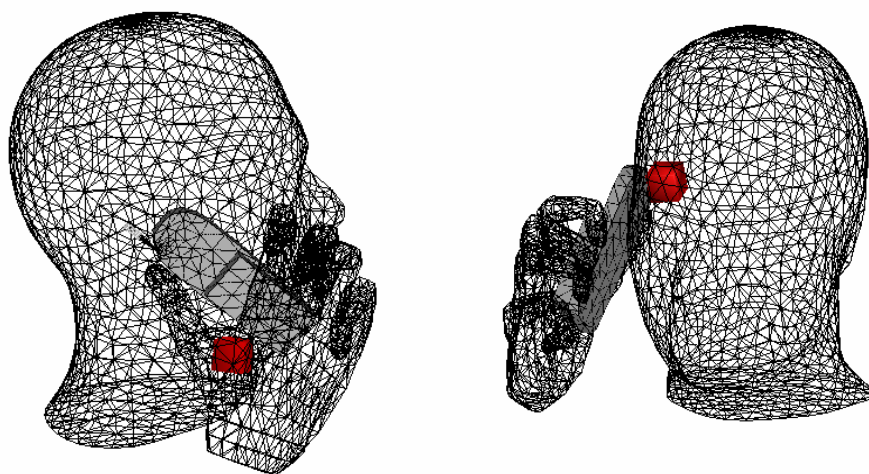


Abbildung 93: Typische Positionen für die Berechnung des über 10 g gemittelten Peak-SAR-Wertes in Hand (links) und Kopf (rechts)

9.3.1 Ergebnisse für GSM 900 (902,5 MHz)

Position	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel in der Hand [W/kg]	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel im Kopf [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR-Wert in der Hand [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR-Wert im Kopf [W/kg]
Mund Touch	0,281	0,357	0,0874	0,0115
Mund Tilt	0,362	0,326	0,114	0,00888
Kinn Touch	0,217	0,405	0,078	0,0121
Kinn Tilt	0,357	0,335	0,115	0,00931
Nase Touch	0,291	0,344	0,088	0,0107
Nase Tilt	0,371	0,289	0,115	0,00859

Tabelle 9: Übersicht der Berechnungsergebnisse für GSM 900

Die verwendeten Gewebeparameter nach [37] bei der untersuchten Frequenz von 902,5 MHz betragen (Tabelle 10):

Gewebe	Permittivität	Leitfähigkeit [s/m]	Dichte [kg/m ³]
Kopf – Gehirnmasse gemittelt	45,795	0,767	1030
Hand – Muskel gemittelt	55,95	0,9701	1040

Tabelle 10: Gewebeparameter bei GSM 900 (902,5 MHz)

9.3.2 Ergebnisse für GSM 1800 (1747,5 MHz)

Position	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel in der Hand [W/kg]	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel im Kopf [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR-Wert in der Hand [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR-Wert im Kopf [W/kg]
Mund Touch	0,0996	0,451	0,0872	0,00759
Mund Tilt	0,093	0,619	0,0916	0,00692
Kinn Touch	0,0871	0,464	0,082	0,0082
Kinn Tilt	0,101	0,644	0,0938	0,00701
Nase Touch	0,111	0,463	0,0865	0,00767
Nase Tilt	0,0814	0,628	0,09	0,00698

Tabelle 11: Übersicht der Berechnungsergebnisse für GSM 1800

Die verwendeten Gewebeparameter bei der untersuchten Frequenz von 1747,5 MHz betragen (Tabelle 12):

Gewebe	Permittivität	Leitfähigkeit [s/m]	Dichte [kg/m ³]
Kopf – Gehirnmasse gemittelt	43,637	1,127	1030
Hand – Muskel gemittelt	54,515	1,36	1040

Tabelle 12: Gewebeparameter bei GSM 1800 (1747, 5 MHz)

9.3.3 Ergebnisse für UMTS (1950 MHz)

Position	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel in der Hand [W/kg]	Peak-SAR-Wert gemittelt über einen 10 g Würfel im Kopf [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR- Wert in der Hand [W/kg]	Über das gesamte Volumen gemittelter SAR-Wert im Kopf [W/kg]
Mund Touch	0,109	0,508	0,0782	0,00796
Mund Tilt	0,0647	0,706	0,0834	0,00743
Kinn Touch	0,0726	0,536	0,0733	0,00867
Kinn Tilt	0,0701	0,727	0,0853	0,00764
Nase Touch	0,0795	0,504	0,0766	0,00793
Nase Tilt	0,0929	0,668	0,082	0,00736

Tabelle 13: Übersicht der Berechnungsergebnisse für UMTS

Die verwendeten Gewebeparameter bei der untersuchten Frequenz von 1950 MHz betragen (Tabelle 14):

Gewebe	Permittivität	Leitfähigkeit [s/m]	Dichte [kg/m ³]
Kopf – Gehirnmasse gemittelt	43,293	1,230	1030
Hand – Muskel gemittelt	54,237	1,478	1040

Tabelle 14: Gewebeparameter für UMTS (1950 MHz)

9.4 Bewertung

Mit den hier resultierenden Ergebnissen ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Sendeleistung des Mobiltelefons (Nokia 6150) und den daraus resultierenden SAR-Werte gegeben. Mit diesen Ergebnissen können nun durch Skalierung für eine beliebige Sendeleistung die zugehörigen SAR-Werte einfach bestimmt werden. Dies bedeutet insbesondere, dass für alle gemessenen Szenarien nun die Umrechnung der Sendeleistung in SAR-Werte möglich ist.

Für die Bestimmung der SAR-Werte in den Kapiteln 9.3.1 bis 9.3.3 wurde eine Sendeleistung des Mobiltelefons von 0,125 W verwendet. Zu beachten ist, dass bei den Berechnungen programmbedingt mit einer kontinuierlich gesendeten Leistung gerechnet worden ist und die Mobiltelefone in der Realität nur in einem von acht Zeitschlitzten senden. Dies bedeutet, dass eine bei den Berechnungen zu Grunde gelegte kontinuierliche Sendeleistung von 125 mW, in der Praxis einer Sendeleistung des Mobiltelefons von 1 W ($1/8 * 1 \text{ W} = 125 \text{ mW}$) entspricht.

Somit können die in der Praxis maximal auftretenden SAR-Werte für die gemessenen Szenarien bei 900 MHz und UMTS doppelt so hoch sein, wie in den Tabelle in Kapitel 9.3.1 respektive 9.3.3 angegeben (max. Sendeleistung bei 900 MHz: 2 W, bei UMTS höchste Leistungsklasse: 2 W) und bei 1800 MHz sind die Werte in der Tabelle in Kapitel 9.3.2 bereits die maximalen. Damit liegen diese ermittelten SAR-Werte nahe an dem vom Hersteller angegebenen SAR-Wert von 0,69 W/kg (nur für 900 MHz und 1800 MHz verfügbar) für diesen Telefontyp.

Beim einem Vergleich dieser für eine reale Exposition ermittelten SAR-Werte mit Herstellerangaben zu verschiedenen Geräten ist zu berücksichtigen, dass Hersteller ihre SAR-Werte nach Normbedingungen ermitteln, in der hier vorliegenden Untersuchung jedoch die alltägliche Benutzung von Mobiltelefonen betrachtet wird.

In den aufgenommen Videosequenzen sind die entsprechenden SAR-Werte ermittelt und als Balken eingefügt worden. Hierzu wurde abhängig von der jeweiligen Frequenz und der Position des Mobiltelefons der zur Sendeleistung gehörende SAR-Wert bei Mittelung über ein 10g würfelförmiges Gewebavolumen ermittelt und in den Filmen eingeblendet.

10. Strahlenhygienische Bewertung

Ziel dieser Studie ist, zu ermitteln, welche SAR-Werte während der alltäglichen Nutzung von Handys auftreten. Bei den durchgeführten Messungen und den daraus rechnerisch ermittelten SAR-Werten zeigt sich, dass die auftretenden SAR-Werte immer unter dem von der ICNIRP vorgegebenen Grenzwert von 2 W/kg bei Mittelung über ein 10 g würfelförmiges Gewebe liegen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch bisher andere Studien.

Vergleicht man die einzelnen GSM-Mess-Szenarien in diesem Projekt:

- PKW-Messungen
- Messungen im Zug
- Messungen beim Gang durch ein Gebäude
- Messungen bei Telefonaten in einem Raum
- Messungen beim zu Fuß gehen im Freien

und die UMTS-Messungen,

so sind sehr klar spezifische Unterschiede zu erkennen.

Zum einen tritt deutlich bei der Strahlungsimmission in den menschlichen Kopf der technische Unterschied zwischen einem GSM-Netz und einem UMTS-Netz zu Tage, der vor allem durch das unterschiedliche Regelverhalten bei einem Zellwechsel und durch die bei Bandspreiztechnik (CDMA) geringeren Sendeleistung geprägt ist.

Bei GSM wird bei jedem Zellwechsel auf den jeweiligen Maximalwert (GSM 900: 2 W, GSM 1800: 1 W) hoch geregelt, um dann anschließend auf den erforderlichen geringeren Wert herunter zu regeln.

Bei UMTS wird ein so genannter Soft-Handover durchgeführt, wobei über eine gewisse Zeit eine Verbindung zu mehreren Basisstationen gleichzeitig besteht und das Handy die minimal mögliche Sendeleistung verwendet, um mindestens von einer Basisstation ausreichend empfangen zu werden.

Bei GSM wurden zum Teil, unseres Erachtens, unnötige Zellwechsel durch das Netz durchgeführt (so z. B. beim Stand vor einer Ampel). In einem UMTS Netz wäre das Telefon vermutlich im Zuge eines Soft-Handovers mit beiden Basisstationen verbunden gewesen. Auch die Netzbetreiber möchten eigentlich unnötige Zellwechsel vermeiden, da diese die Kapazität ihrer Netze einschränken.

Zum anderen sind auch sehr gut die Unterschiede zwischen gut und nicht so gut versorgten Gebieten zu erkennen. Strahlenhygienisch am besten wäre es, an einer Stelle zu telefonieren, an der es zu keinem Zellwechsel kommt, und an der die Feldversorgung möglichst hoch ist. Die Stärke der Feldversorgung kann durch die Netzbetreiber festgelegt werden. Für die Handynutzer sind daher mehrere Basisstationen im Ort günstiger, als eine außerorts liegende entfernte Basisstation. Bewegt sich der Handynutzer, so kommen bei vielen Basisstationen jedoch zusätzliche Zellwechsel hinzu.

Die Zahl der Basisstationen bei GSM wird von den Netzbetreibern jedoch nicht nach den Kriterien einer hohen oder niedrigen Feldversorgung bestimmt, die Feldversorgung muss nur ausreichend sein, sondern die Zahl der Basisstationen ist abhängig von der im Netz erforderlichen Kapazität. Die Netz-Kapazität kann nur durch zusätzliche Basisstationen / Zellen erhöht werden; zusätzliche Basisstationen / Zellen bedeuten nicht unbedingt zusätz-

liche Standorte, da ein bestehender Standort auch mit zusätzlichen Basisstationen / Zellen versehen werden kann. Die nunmehr hohe Anzahl von GSM-Nutzern erfordert auch eine hohe Zahl von Basisstationen. Dies ist gut zu erkennen an dem Vergleich der Messungen aus dem Jahre 1998 [2] mit unseren Messungen aus dem Jahr 2004, bei denen wir auf einer als vergleichbar angesehenen Strecke eine höhere Zahl von Zellwechselln aufgrund der heute erforderlichen hohen Zahl von Basisstationen hatten.

Bei den GSM-Messfahrten im Zug zeigte sich, dass auf der untersuchten langen Strecke von Stuttgart bis Göttingen größtenteils die Feldversorgung sehr schlecht war und dies dann einen hohen Sendepiegel des Mobilteils zur Folge hatte. Dabei wurden die Zugmessungen bereits in einem Repeater-Wagen durchgeführt. In einem Repeater-Wagen werden die GSM-Signale durch eine Außenantenne außerhalb des Zugwagens empfangen und dann innerhalb des ICE Wagens abgestrahlt. Umgekehrt wird die Sendeleistung des Handys von der Repeater-Innenempfangs-Antenne aufgenommen und dann außerhalb des Wagens verstärkt ausgesendet.

Strahlenhygienisch äußerst interessant waren die Messungen auf der CeBIT 2005. Hier hatten zwei Netzbetreiber GSM-Regelungsverfahren implementiert, die zu einer äußerst marginalen Strahlenbelastung des Nutzers führen.

So hat z. B. ein Netzbetreiber in einem GSM 900-Netz die Leistungsregelung der Basisstation so eingestellt, dass sie bei einem Zellwechsel nicht auf 2 W, sondern nur auf 0,5 W hoch regelt und gleichzeitig schnell und konsequent die Leistung herunter regelt. Dies führte zu einem SAR-Wert von 0,03 W/kg (zugelassen wären 2 W/kg) bei einer mittleren maximalen Sendeleistung von 0,07 W (maximal möglich wären 2 W).

Ein anderer Netzbetreiber mit GSM 1800-Netz hatte dort eine so genannte "One Shot Power Control"-Regelung eingeführt, die dazu führte, dass in 90 % der Kommunikationszeit das GSM-Handy in der kleinstmöglichen Leistungsstufe 0,001 W (maximal möglich wären 1 W) sendete. Dies führte zu einem SAR-Mittelwert von 0,001 W/kg (zugelassen wären 2 W/kg).

Bei den Messungen im Raum ohne Zellwechsel traten zum einen Ergebnisse auf, mit denen gerechnet wurde, z. B. dass bei einer guten Feldversorgung eine geringere Sendeleistung des Mobilteils erforderlich ist, als auch Effekte, mit denen nicht gerechnet wurde, wie ein Hochregeln des Mobilteils ohne ersichtlichen Grund.

Da alle Messungen auf Video dokumentiert und in diese Videodaten später bei der Nachbearbeitung die Messparameter und der errechnete SAR-Wert eingeblendet wurden, lässt sich sehr gut die Abhängigkeit der Sendeleistung von Körperhaltung oder Bewegung feststellen. So trat ein Hochregeln der Sendeleistung auf – dies war auch erwartet – wenn die Person das Mobiltelefon in einen Bereich mit schlechterer Feldversorgung brachte bzw. das Mobilteil mit der Hand oder dem Körper abschirmte. Es traten jedoch auch Leistungsregelungen auf, ohne dass die Person sich bewegte.

Dies ist erklärbar mit dem grundsätzlichen Aufbau und Regelverhalten von GSM-Netzen. Die Basisstation misst die Bitfehlerrate des bei ihr ankommenden Datenstroms und bestimmt aus der Bitfehlerrate die für das Mobilteil erforderliche Sendeleistung. Dieser Datenstrom Richtung Basisstation kann durch Änderungen auf dem Übertragungsweg zwischen Mobilteil und Basisstation beeinflusst werden. So kann durch Reflexionen von sich bewegenden Fahrzeugen und durch Dämpfungen, z. B. durch sich im Wind bewegende Bäume, die Bit-

fehlerrate an der Basisstation sich ändern, ohne dass die nutzende Person sich bewegt oder eine Änderung der Umgebungsbedingungen am Ort des Telefonats der Auslöser für die Verschlechterung des Übertragungsweges ist. So wurde bei mehreren Messungen festgestellt, dass die Sendeleistung hoch geregelt wurde, ohne dass es aus der Videodokumentation nachvollziehbar war.

Bei den ergänzenden UMTS-Messungen zeigte sich, dass die Strahlungsimmission in den Menschen sehr viel geringer ist als bei GSM. Wir haben bei UMTS auch Szenarien gemessen, bei denen der SAR-Wert nur noch 1/10.000 des Grenzwertes von 2 W/kg betrug.

Aus diesem Grunde wäre aus strahlenhygienischer Überlegung die UMTS-Nutzung sehr interessant. Für Personen, die ihre persönliche Strahlungsbelastung reduzieren wollen, wäre hierfür die Verwendung von UMTS-Endgeräten in UMTS-Netzen eine alternative Möglichkeit. Die auf dem Markt befindlichen UMTS-Endgeräte buchen sich bevorzugt in das UMTS-Netz ein (im Display erkennbar an einem Symbol). Ist kein UMTS-Netz des zuständigen Netzbetreibers vorhanden, bucht sich das UMTS-Endgerät, das immer ein Mehrbandgerät ist, in dem entsprechenden GSM-Netz ein. Bei vielen Geräten besteht zudem die Möglichkeit, ausschließlich das UMTS Netz zu nutzen.

Ein Nutzer könnte z. B. anhand des im Display sichtbaren Symbols dann sein Telefonierverhalten – Dauer des Telefonats oder Verwendung einer Freisprecheinrichtung oder Nutzung eines Kopfhörers – vom jeweils verwendeten Netz abhängig machen.

Informationen über die unterschiedliche Strahlungsimmissionsbelastung des Menschen bei alltäglicher Nutzung in UMTS-Netzen und GSM-Netzen liegen der allgemeinen Bevölkerung jedoch nicht vor.

Eventuell könnte der Informationsstand durch diese Projektergebnisse verbessert werden. Wobei wir jedoch darauf hinweisen müssen, dass dieses Projekt, da es vom BfS als GSM-Projekt ausgeschrieben und aus Interesse des Auftragnehmers auf UMTS erweitert wurde, für UMTS-Netze nicht die Bedingungen für breit angelegte Untersuchungen in unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedlichen Personen erfüllt.

Der Satz aus der Leistungsbeschreibung "Um belastbare und sinnvolle Vorsorgeempfehlungen geben zu können, sind die mit dem Vorhaben angestrebten Ergebnisse unbedingt erforderlich" ist durch die nun vorhandenen Kenntnisse über die bei der alltäglichen Nutzung auftretenden SAR-Werte erfüllt.

Um Mobilfunkendgeräte jedoch bezüglich des "Blauen Engels" bewerten zu können, müssten unterschiedliche Mobilfunkendgeräte unter exakt gleichen elektromagnetischen Feldbedingungen verglichen werden. Exakt gleiche und reproduzierbare elektromagnetische Feldbedingungen lassen sich jedoch nur unter Laborbedingungen erzeugen. Da in diesem Projekt jedoch die alltägliche Nutzung und die dabei momentan auftretenden SAR-Werte in Abhängigkeit vom Verhalten der Personen und der Netzparameter zu unterscheiden waren, eignen sich die Ergebnisse nicht zum Vergleich der unterschiedlichen Mobilfunkendgeräte. Aus diesem Grunde wurde in den bisherigen Projekt-Ausarbeitungen und auch in diesem Schlussbericht kein Handyvergleich aufgestellt, obwohl vier unterschiedliche Handymodelle für die Untersuchungen verwendet wurden.

Das in diesem Projekt erstmals verwendete Verfahren, die jeweiligen Größen direkt auszulesen und den zugehörigen SAR-Wert mit dem Feldberechnungsprogramm FEKO zu berechnen und anschließend die Messwerte und den berechneten Wert zeitkongruent in das zugehörige Videobild einzukopieren, geben zum ersten Mal Aufschluss über die Abhängigkeit der Sendeleistung und des SAR-Wertes vom Empfangspegel, vom Verhalten der Versuchsperson und vom Umfeld.

11. Literaturverzeichnis

- [1] IMST (Bornkessel) und EM-Institut (Wuschek)
Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 86179 Augsburg, Abschlussbericht, Dezember 2004, www.bayern.de/lfu

- [2] J. Wiart, C. Dale, A. V. Bosisio, A. Le Cornec
Analysis of the Influence of the Power Control und Discontinuous Transmission of RF Exposure with GSM Mobile Phones
IEEE Trans. Electromagnetic Compat, vol. 42, no 4, November, 2000

- [3] CENELEC: EN 50361
Grundnorm zur Messung der Spezifischen Absorptionsrate (SAR) in Bezug auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen (300 MHz bis 3 GHz), 2001.

- [4] R. A. Abd-Alhameed, P. S. Excell, J. Vaul, and J. Mustafa
Interference probability due to GSM mobile phone using a galerkin solution with polynomial basis functions
Cost 261, Electromagnetic Compatibility in Complex and Distributed Systems, (Eindhoven, Netherland), November 2001

- [5] K. Pokovic, T. Schmid, and N. Kuster
Millimeter-resolution E-field probe for isotropic measurement in lossy media between 100 MHz and 20 GHz
Trans. Instrumentation Meas., vol. 49, pp. 873-878, August 2000

- [6] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and *Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*
Health Phys., vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998

- [7] R. W. Y. Habash and H. T. Alhafid
Dosimetry for evaluating EM fields within human body
International Journal of Bioelectromagnetism, no. 2, pp. 161-162, 2002

- [8] *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*

- [9] *Empfehlung des Europäischen Rates (1999/519/EG) zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0-300 GHz)*
- [10] T. Schmid, O. Egger, and N. Kuster
Automated E-field scanning system for dosimetric assessments
IEEE Trans. Microwave Theory Techn., vol. 44, pp. 105-113, January 1996
- [11] M. Guelfi, F. Apollonio, N. Grazioli, S. Nocentini, G. Marrocco, and G. A. Lovisolo
Dosimetric procedures for compliance tests of mobile communication devices
Physical Medica, vol. 13, January 1997
- [12] G. A. Lovisolo, R. Pinto, L. Ardoino, and S. Mancini
Dosimetric techniques for the evaluation of the em power absorption induced by cellular phones
Nuclear Technology Publishing. Radiation Protection, vol. 97, no. 4, pp. 369-374, 2001
- [13] H. I. Bassen and G. S. Smith
Electric field probes - a review
IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 31, pp. 710-718, September 1983
- [14] K. Pokovic, T. Schmid, J. Fröhlich, and N. Kuster
Novel probes and evaluation procedures to assess field magnitude and polarization
IEEE Trans. Electromagnetic Compat., vol. 42, pp. 240-244, May 2000
- [15] M. Klar
Effiziente Verfahren zur Bestimmung der Einkopplung elektromagnetischer Felder in den menschlichen Körper
Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2002
- [16] H.-O. Ruoss, M. Klar, W. Spreitzer, and G. Fässler
Fast and accurate SAR-testing of hand-held mobile telephones: Measurement technique, set-up and first assessment of accuracy
AEÜ International Journal of Electronics und Communications, vol. 54, no. 3, pp. 155-162, 2000
- [17] H. Eder, V. Hombach
Mobiler Messkopf zur standortbezogenen Teilkörper-SAR-Messung an Mobiltelefonen und Basisstationen
Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik (LfAS), München

- [18] F.J.C. Meyer and U. Jakobus
Numerical techniques in RF dosimetry related to mobile phone technology.
In P. Stavroulakis (ed.): *Biological Effects of Electromagnetic Fields*, chap. 3.3, pp. 171-237. Springer Verlag, New York, 2003.
- [19] FEKO
Softwareprodukt von EM SOFTWARE & SYSTEMS.
URL: <http://www.feko.info>.
- [20] U. Jakobus, F. J. C. Meyer, M. Bingle, and D. B. Davidson
Analyse von Problemstellungen der EMVU durch eine Kombination der Rechenverfahren MoM und FEM.
In: ITG Fachtagung Antennen Berlin, S. 241 – 244, Sept. 2003.
- [21] U. Jakobus
Comparison of different techniques for the treatment of lossy dielectric/magnetic bodies within the method of moments formulation.
AEÜ International Journal of Electronics and Communications, vol. 54, no. 3, pp. 163-173, 2000.
- [22] FJC Meyer and U. Jakobus
Comparison of Computer Simulated and Measured SAR Values in the Head of a Human Phantom next to a Mobile Phone, in the Proceedings of the ACES Conference, Monterey, USA, 1999.
- [23] FJC Meyer, KD Palmer, D le Roux, and U Jakobus
Numerical SAR Assessment using a Highly Optimized Method of Moments (MoM) Based Implementation,
in Proceedings of the Twenty Second Annual Meeting of the Bioelectromagnetic Society, (Munich, Germany), June 2000.
- [24] FJC Meyer, KD Palmer and U Jakobus
Realistic Hand and Head Modelling for Accurate SAR Assessment Using a Method of Moments (M3oM) Based Implementation, in Proceedings of the Twenty Third Annual Meeting of the Bioelectromagnetic Society,
(St Paul, USA), June 2001.

- [25] FJC Meyer, KD Palmer and U Jakobus
Investigation into the accuracy, efficiency and applicability of the method of moments as numerical dosimetry tool for the head and hand of a mobile phone user
Applied Computational Electromagnetics Society Journal: Special Issue on Bioelectromagnetic Computations, vol. 16, pp. 114-125, July 2001.
- [26] TCO Development
TCO'01 Certification of Mobile Phones
Stockholm, Schweden, 2001
- [27] connect Heft 15/2001 und connect Heft 8/2002
- [28] L. Ardoino, JD Bowman, E. Cardis, s. Mann, P. Vecchia, J. Wiart
Radiofrequency exposure of mobile phone users: The activity of the INTERPHONE study group
Proceedings of the EBEA 2001, 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association, Sept.
- [29] F.J.C. Meyer, D.B. Davidson, U. Jakobus, M.A. Stuchly
Human exposure assessment in the near field of GSM base-station antennas using a hybrid finite element/method of moments technique
IEEE Trans. Biomedical Engineering, vol.50, no.2, pp.224-233, Feb. 2003.
- [30] L. Ardoino, E. Barbieri und P. Vecchia
Determinants of Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones
Radiation Protection Dosimetry Vol. 111, No. 4 © Oxford University Press 2004 pp. 403-406 doi: 10.1093/rpd/nch062
- [31] M. Wuschek
Untersuchung der Leistungsregelung eines GSM-Mobiltelefons unter realen Betriebsbedingungen
FGF Newsletter 1/2005, EMVU und Technik, Seite 40-50, 2005, www.fgf.de
- [32] S. Lönn, U. Forssén, P. Vecchia, Al. Ahlbom, M. Feychting
Output Power Levels from Mobile Phones in different Geographical Areas; Implications for Exposure Assessment.
Occup Environ Med 2004; 61:769-772. doi: 10.1136/oem.2003.012567,
www.occenvmed.com

- [33] TCO Development
Welche Handys strahlen am wenigsten? Test von 25 Handys
Bericht von TCO Development, Mai 2004; www.tcodevelopment.com und www.handyzertifizierung.de
- [34] IEEE Standards Coordinating Committee 34, Subcommittee 2
IEEE SCC34/SC-2, unapproved draft recommended practice document
IEEE SCC34/SC-2, 2000.
- [35] IEEE Standards Coordinating Committee 34, Subcommittee 2
Draft Recommended Practice for Determining the Spatial-Peak Specific Absorption Rate (SAR) Associated with the Use of Wireless Handsets - Computational Techniques
Tech. Rep. IEEE P1529/D0.0, IEEE SCC34/SC-2, 2002.
- [36] M Bingle and FJC Meyer
Determination of the spatial-peak SAR in human models from a hybrid FEM/MOM solution
poster P-B-8, BEMS meeting, June 20-24, 2004.
- [37] Federal communications commission's website
www.fcc.gov/cgi-bin/dielec.sh.
- [38] KH Chan, SW Leung, LC Fung and YM Siu
Experimental Study of the SAR Characteristics of Mobile Phones
Microwave and Optical Technology Letters, vol. 40, no. 1, pp. 22-26, January 2004.

12. Erläuterungen

12.1 Erläuterung zu Standardabweichung und Mittelwert

Bronstein, Taschenbuch der Mathematik 4. überarbeitete und erweiterte Auflage 1999
S. 784: Fehler der Einzelmessung einer Messreihe

Aus den Gleichungen (16.186b) und (16.188) ergibt sich der Näherungswert für die Standardabweichung zu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$$

Mit

n: Anzahl Messungen ($n > 1$; für $n = 0$ oder $n = 1$ ist Standardabweichung nicht definiert und natürlich auch nicht sinnvoll)

x_i : Wert der Messung Nr. i

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Mittelwert der Messungen}$$

Bemerkungen

- Bronstein spricht von Näherungswert, weil davon ausgegangen wird, dass dem gemessenen Prozess eine (gleich bleibende) Standardabweichung zu Grunde liegt, die nur mit unendlich vielen Messungen bestimmt werden könnte.
- Es gilt: $0 \leq \sigma < \infty$
- Anschaulich: Je dichter die Messwerte um den Mittelwert verteilt liegen, desto kleiner ist σ . Wurde bei einer Messreihe stets nur ein einziger Zahlenwert gemessen, ist $\sigma = 0$.
- Für die Berechnung ist nicht relevant, in welcher Reihenfolge die Messwerte aufgezeichnet wurden
- Mittelwert und Standardabweichung sind linear skalierbar, d.h. wenn anstelle der (Spitzen-)Sendeleistung die mittlere Sendeleistung verwendet werden soll, können die Werte einfach durch 8 geteilt werden. Beweis mit beliebigem Skalierungsfaktor s:

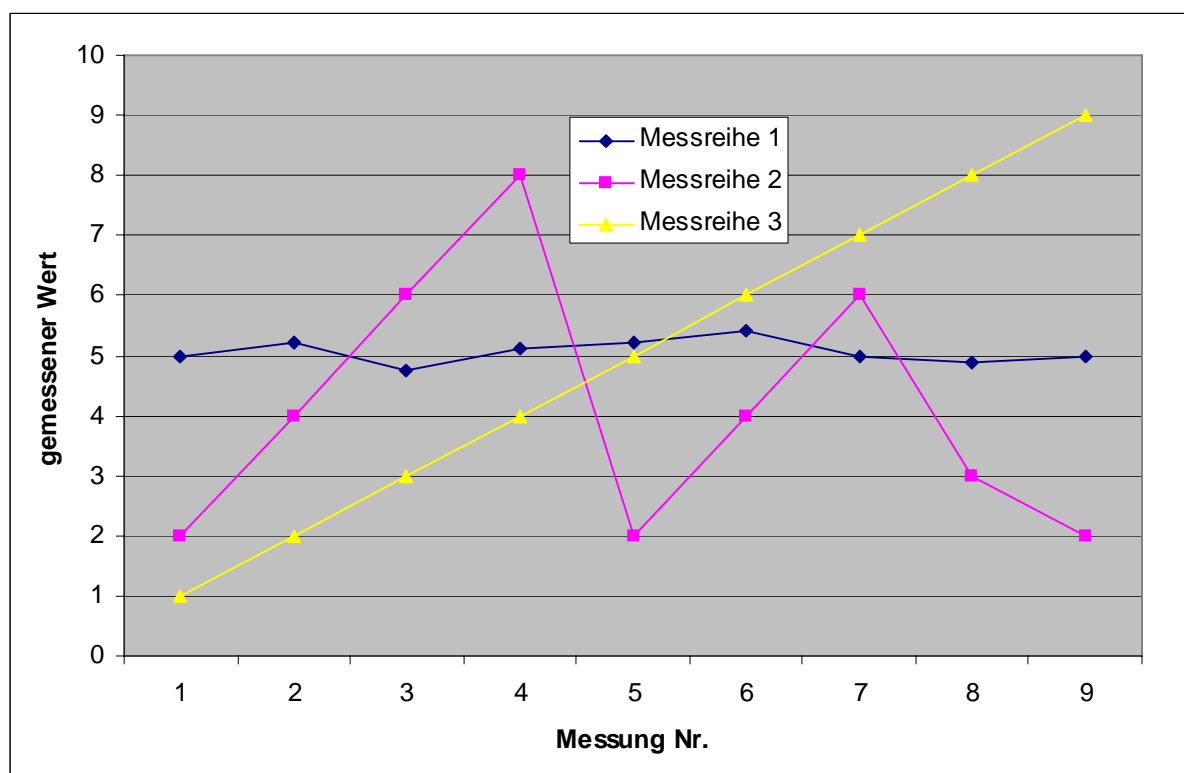
Mittelwert:

$$\bar{x}_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{s}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{s n} = \frac{\bar{x}}{s}$$

Standardabweichung:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{x}_s - x_i}{s} \right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{x} - x_i}{s} \right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{x} - x_i}{s} \right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{s^2}}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{s^2 (n-1)}} \\ &= \frac{1}{s} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{(n-1)}} = \frac{\sigma}{s}\end{aligned}$$

Beispiel:



	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
Mittelwert	5,06	4,11	5,00
Standardabweichung	0,19	2,15	2,74

Bei Messreihe 1 liegen alle Messwerte um den Mittelwert von ca. 5 verteilt, daher ergibt sich eine kleine Standardabweichung.

Messreihe 2 bewegt sich in einem größeren Wertebereich zwischen 2 und 8 bei einem Mittelwert von ca. 4. Durch die hohen Schwankungen wird eine größere Standardabweichung erreicht.

Messreihe 3 besitzt im Vergleich zu Messreihe 1 zwar einen ähnlichen Mittelwert, jedoch führt die deutlich größere Streuung der Messwerte zu einer höheren Standardabweichung.

Begründung für die Angabe der statistischen Größen der Empfangsleistung in (negativen) dBm.

Zur Abbildung der statistischen Größen Mittelwert und Standardabweichung werden die linearen Werte der Empfangsleistungspegel verwendet.

$$r_{lin,i} = \frac{10^{\frac{r_{dB,i}}{10}}}{1000}$$

Mit

$r_{lin,i}$: Linearer Empfangsleistungspegel der Messung i, Einheit: W

$r_{dB,i}$: Logarithmierter Empfangsleistungspegel der Messung i, Einheit dBm

Berechnung des Mittelwerts mit linearen Werten:

$$\overline{r_{lin}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{lin,i}}{n}$$

Der Mittelwert hat die Einheit:

$$[\overline{r_{lin}}] = \frac{\sum_{i=1}^n W}{1} = W$$

Der lineare Mittelwert wird in einen logarithmischen Mittelwert überführt:

$$\overline{r_{dB}} = 10 \log(\overline{r_{lin}} \cdot 1000)$$

Einheit:

$$[\overline{r_{dB}}] = \text{dBm}$$

Berechnung der Standardabweichung mit linearen Werten:

$$\sigma_{lin} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{r_{lin}} - r_{lin,i})^2}{n-1}}$$

Die Standardabweichung hat die Einheit:

$$[\sigma_{lin}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W - W)^2}{1}} = \sum_{i=1}^n (W - W) = W$$

Der lineare Wert wird wiederum in den logarithmischen Wert überführt.

$$\sigma_{dB} = 10 \log\left(\frac{\sigma_{lin}}{1000}\right)$$

$$[\sigma_{dB}] = \text{dBm}$$

Aus $\sigma_{dB} = 10 \log(\sigma_{lin} \cdot 1000)$ folgt: Wenn $\sigma_{lin} < 1 \text{ mW}$ wird σ_{dB} negativ.

12.2 Erläuterung zu den Leistungsregelungsstufen

12.2.1 Erläuterung zu den Leistungsregelungsstufen bei GSM

In Deutschland arbeiten die D-Netz Handys (900 MHz) mit einer maximalen Leistung von 2 W, d.h. die gemittelte maximale Leistung beträgt 0,25 W (2W geteilt durch 8 {aufgrund des Sendens nur in jedem 8. Zeitschlitz} = 0,25 W)

In Deutschland arbeiten die E-Netz Handys (1.800 MHz) (Eplus und O2 (früher Viag Interkom)) mit einer maximalen Leistung von 1 W, d.h. die gemittelte maximale Leistung beträgt 0,125 W (1W geteilt durch 8 {aufgrund des Sendens nur in jedem 8. Zeitschlitz} = 0,125 W)

Die tatsächlich erforderliche Sendeleistung wird vom Netz in Stufen je nach Erfordernis geregelt. Deshalb sendet ein GSM-Mobiltelefon in der Regel mit unterschiedlicher Leistung. Nachstehend die neuen Leistungsstufen (33 dBm bis 5 dBm) in den D-Netzen (T-Mobile und Vodafone) beginnend bei maximal 2 W, wobei die Basisstation fernsteuernd das Handy herunterregelt. Die Leistungsregelung hat eine Dynamik von 28 dB = Faktor 630.

GSM 900 (D-Netze) T-Mobile und Vodafone

Leistungsstufe	dBm	Watt	Leistungsstufe	dBm	Watt
5	33	2,0	13	17	0,050
6	31	1,3	14	15	0,032
7	29	0,8	15	13	0,020
8	27	0,5	16	11	0,013
9	25	0,32	17	9	0,008
10	23	0,2	18	7	0,005
11	21	0,125	19	5	0,003
12	19	0,080			

Die frühere Leistungsregelung, die noch in Betrieb ist, hatte nur eine Leistungsregelung um den Faktor 100 = 20 dB d.h. von 33 dBm (2 W) bis hinunter zu 13 dBm (0,02 W).

Nachstehend die Leistungsstufen in den E-Netzen (Eplus und O2), beginnend bei maximal 1 W.

Von 1 Watt beginnend regelt das Handy von der Basisstation gesteuert herunter.

GSM 1800 (E-Netze: Eplus und O2)

Leistungsstufe	dBm	Watt	Leistungsstufe	dBm	Watt
0	30	1,0	8	14	0,025
1	28	0,63	9	12	0,016
2	26	0,4	10	10	0,010
3	24	0,25	11	8	0,006
4	22	0,16	12	6	0,004
5	20	0,1	13	4	0,0025
6	18	0,006	14	2	0,0016
7	16	0,040	15	0	0,001

12.2.2 Erläuterung zur Sendeleistungsregelung bei UMTS

Regelungsbereich des UMTS-Handys

Die UMTS-Handys besitzen in der Leistungsregelung sogar einen Regelungsbereich von 80 dB, dies entspricht dem Faktor 100 Millionen.

Bei den UMTS-Systemen arbeitet die Leistungsregelung wegen der technischen Notwendigkeit sowohl schneller als auch stärker. Die Leistungsregelung erfolgt alle 667 msec, d. h. mit einer Frequenz von 1.500 Hz in Stufen zwischen 1 dB und 3 dB.